EL COHETE VASIMR • MEJORA GENETICA DEL TRIGO

INVESTIGACION y CIENCIA

ENERO 2001
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

POSIBILIDADES TECNICAS DEL OCIO DIGITAL



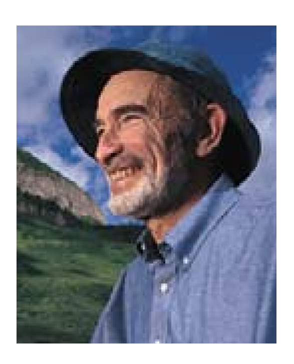
REACCION NUCLEAR EN CADENA

00292
9 770210 136004



Enero de 2001 Número 292

SECCIONES

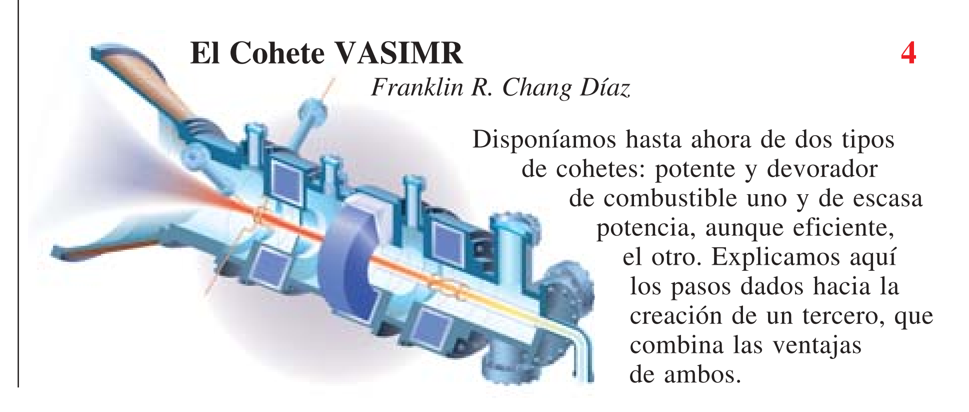






INFORME ESPECIAL





Disponíamos hasta ahora de dos tipos de cohetes: potente y devorador de combustible uno y de escasa potencia, aunque eficiente, el otro. Explicamos aquí los pasos dados hacia la creación de un tercero, que combina las ventajas de ambos.

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Philip Howe y Mac Congrave

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Pam Francis
6	Samuel Velasco
7	Juan Velasco (*arriba*); John de Santis (*abajo*)
8-9	Pam Francis
10	John de Santis
12-13	Karin Retief/*Trace Images*
14	Dan Wagner; Cortesía de Irene Franck (*píldoras*)
15-17	Karin Retief/*Trace Images*
18-21	Jennifer Johansen
22	"March of Time"/Time Pix
23	AIP Emilio Segrè Visual Archives
39	Tom Draper Design (*ilustración*); Sony Pictures Imageworks (*Hollow Man*); Atomfilms (*Space Dog*); Katia Natola *S.I.N./Corbis* (*Metallica y detalle de guitarra*); ©2000 Warner Bros. (*The Perfect Storm*)
40	Terry Renna (*izquierda*); Sony Computer Entertainment (*derecha*)
41	RMN/Art Resource, New York
42-43	Tom Draper Design
44	Bryan Christie
45	ABC, Inc.
46-47	Bryan Christie
48	Cortesía de los autores
49	Lisa Pines; Newsmakers (*inserto*)
50	Bryan Christie
51	Dennis Cook *AP Photo*
52	Cortesía del autor
54-55	Next Wave Films
56-57	George Retseck
58-59	Bryan Christie
60	Cortesía del autor
63	George Retseck (*arriba*); Sherri A. Liberman (*abajo*)
64	Cortesía de Sony Pictures Imageworks
66-67	©2000 Warner Bros.
68-69	Pixar Animation
70	Pixar Animation (*arriba*); Louis Fabian Bachrach (*abajo*)
71	Webb Chappel
72-73	Cortesía de Edwin Brit Wyckoff (*Winky Dink*); cortesía de David Winter (*Pong*); Digital Leisure, Inc. (*Dragon's Lair*); Maxis, Inc. (*Sim City*); Cyan, Inc. (*Myst*); Screen Shot from America Online (*Big Brother*)
74	Webb Chappel
76-83	Pilar Barceló y Adoración Cabrera

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Adrados: *El cohete VASIMR*; Esteban Santiago: *Fármacos antisida para Africa*; Xavier Roqué: *La extraña pareja y la bomba*; Luis Bou: *Introducción al Informe especial*, *Creación de convergencia*, *Guerra en la música*, *De cerca* y *Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Transición en el rodaje*, *El cine digital y sus posibilidades* y *Perfiles*; Juan Pedro Campos: *Humanos virtuales* y *Un mundo virtual a medida*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

Ciencia y sociedad:

José Manuel García de la Mora: *El pH, devaneos filológicos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
ON-LINE EDITOR Kristin Leutwyler
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Carol Ezzell, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette
PRODUCTION William Sherman
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.500 pta.	21.500 pta.
	69,12 euro	129,22 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

EL CUERPO HUMANO EN EL ESPACIO. «¿Qué tal le irá al explorador humano en su astronave? La ingravidez evoca una imagen placentera: flotar en el espacio sin tensiones de ningún tipo parece una situación agradable e incluso ventajosa. Pero no será tan poco preocupante como parece. Es más que probable que la naturaleza nos cobre su precio por ese paseo gratis. En la Tierra carecemos de experiencia que nos indique sobre algo similar. Parece que no hay que prever dificultades graves en las funciones de la circulación sanguínea y en la respiratoria. Es en el sistema nervioso humano, sus órganos perceptivos y su mente, donde podemos esperar complicaciones cuando el cuerpo se torne ingrávido.»

DIANÉTICA. [Reseña de libro] «Dianética: Ciencia Moderna de la Salud Mental, por L. Ron Hubbard, Hermitage House (4 dólares). Este volumen es probablemente el que contiene más promesas y menos hechos que cualquier otra publicación desde la invención de la imprenta. Brevemente, su tesis es que el hombre es intrínsecamente bueno, posee un recuerdo perfecto de todos los sucesos de su vida y es bastante más inteligente de lo que aparenta. Sin embargo, una cosa llamada engrama impide que esas características se realicen en la conducta humana... Mediante un proceso llamado ensueño dianético, que se asemeja a la hipnosis y que al parecer puede practicar cualquiera entrenado en la dianética, pueden evocarse tales engramas. Conseguido esto, los engramas son 'reclasificados' y el paciente queda 'libre'... El sistema se presenta sin títulos ni datos.»

...cien años

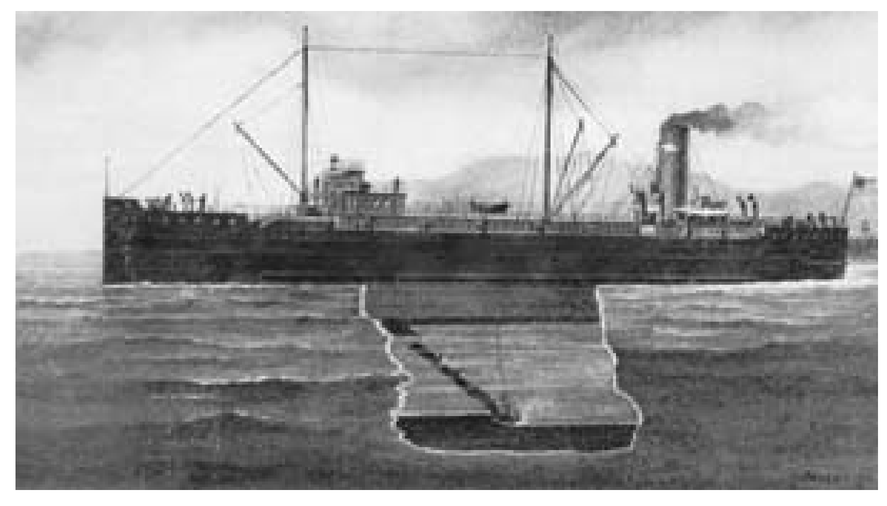
PRODUCCIÓN DE VACUNAS ANTIVARIÓLICAS. «Hasta 1876, en Nueva York era práctica común la vacuna brazo a brazo, y la linfa se tomaba de la ampolla de un niño de pocos meses ya vacunado. Pero la linfa humana siempre resultó inquietante, al tratarse de un posible foco de infección de enfermedades sanguíneas. En 1876 el departamento de sanidad de la ciudad puso los cimientos del laboratorio de vacunación actual. A una ternera se le practica una incisión lineal superficial en la piel, en la que se unta el virus de la vacuna. A los pocos días aparecen las ampollas de las que se obtiene el virus. Este, emulsionado en glicerina, se introduce en pequeños tubos capilares de vidrio, cada uno de los cuales contiene el virus suficiente para una vacuna.»

TURBINAS DE VAPOR. «Al igual que las turbinas terrestres [para generar electricidad], como las instaladas en Inglaterra y Alemania, han superado a los mejores motores alternativos de triple expansión en producción de vapor, en las instalaciones marinas la turbina de vapor está destinada a sustituir al motor alternativo en todos los buques rápidos, desde los medios hasta los grandes tonelajes.- Charles A. Parsons» [*Nota de la redacción: A Parsons se le considera el inventor de la turbina de vapor moderna.*]

EL EXTERMINIO DE LOS MOSQUITOS. «No debe sorprendernos esta predicción para el siglo que viene: De las ventanas desaparecerán las mosquiteras, gracias a la exterminación en masa de esos insectos. Los organismos sanitarios habrán destruido todos los nidos y criaderos, avenado todas las charcas estancadas, desecado todos los terrenos pantanosos y tratadas químicamente todas las corrientes de aguas tranquilas.»

SEGUROS ANTIANARQUISMO. «El rey Alejandro de Serbia ha intentado asegurar su vida por dos millones de dólares en varias compañías, pero una de ellas, a las que solicitó un seguro por 300.000 dólares, rechazó suscribir la póliza aduciendo la proliferación de los delitos anarquistas.»

DRAGA HIDRÁULICA. «El rápido aumento que en los últimos años ha tenido lugar en el tamaño y calado de los vapores oceánicos ha hecho necesario ahondar considerablemente los canales tanto de los accesos al puerto de Nueva York como en el puerto mismo. Se incluye una ilustración de una de las dos dragas de ganguiles hidráulicas (las más potentes de su clase en el mundo) que excavarán unos treinta millones de metros cúbicos del nuevo canal Ambrose. Es capaz de extraer arena y agua por el conducto mediante una bomba de dragado de más de 1,2 metros en aspiración y descarga.»



DRAGA HIDRAULICA para el puerto de Nueva York, 1901

...ciento cincuenta años

MEDICINA NAPOLITANA. «Los napolitanos son de la opinión de que las sangrías son necesarias en numerosas enfermedades para las que, entre nosotros, se considerarían fatales.»

El cohete

Franklin R. Chang Díaz

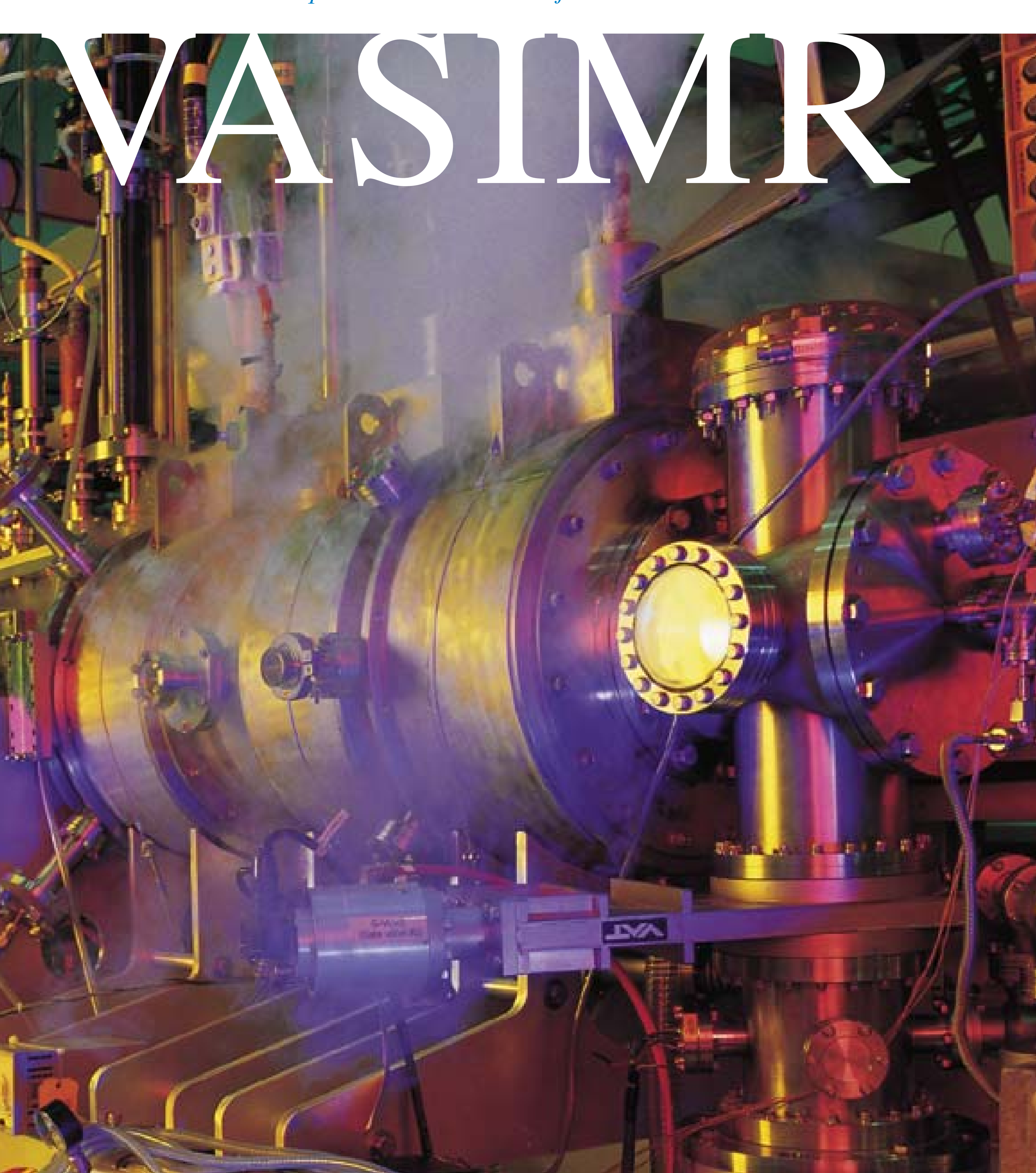
Soñamos con ir a las estrellas. Los de mi generación pasamos la infancia, allá por los años cincuenta, imaginándonos que un día seríamos pilotos del espacio. Comprobé más tarde que aquella fascinación no era privativa de mi educación en Costa Rica. Muchos de mis actuales colaboradores, procedentes de distintas partes del mundo, relatan semejantes anhelos infantiles. En los últimos 50 años, he sido testigo del desarrollo de las primeras naves que han transportado al hombre allende los confines de la Tierra. En los últimos 20, he tenido la suerte de subir a bordo de alguno de estos cohetes y recibir una impresión de primera mano de las maravillas que imaginaba. Parece como si estuviésemos destinados a abandonar nuestro frágil planeta y desplazarnos en el cosmos en una nueva odisea humana. Esta empresa dejaría pequeña a la aventura colombina.

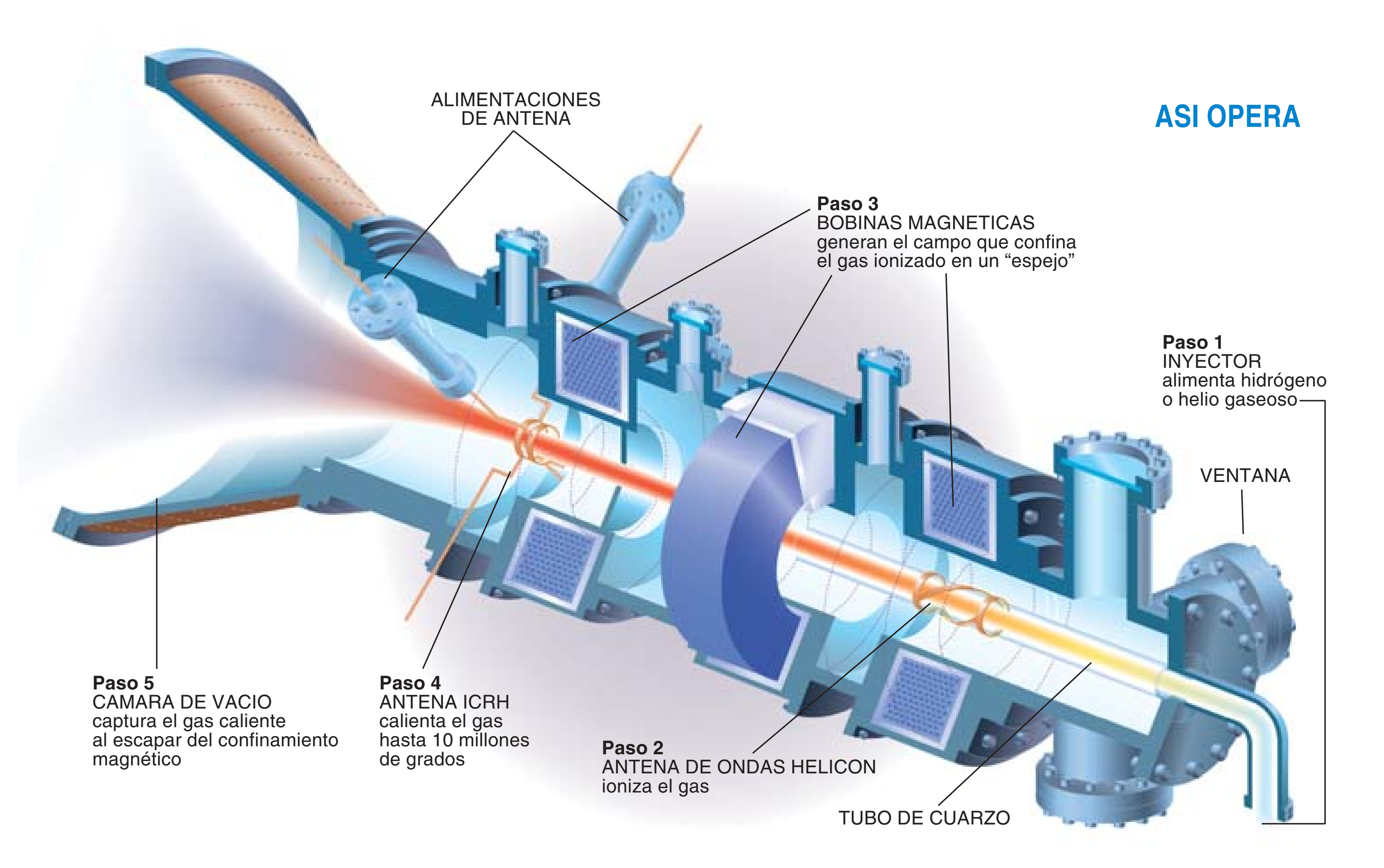


1. MOTOR COHETE DE NUEVO CUÑO. Con sólo tres metros de longitud, produce gases de escape a una velocidad sin precedentes: 300 kilómetros por segundo. La ventana que se observa a la derecha revela el plasma que brilla en el interior.

Disponíamos hasta ahora de dos tipos de cohetes: potente y devorador de combustible uno y de escasa potencia, aunque eficiente, el otro. Explicamos aquí los pasos dados hacia la creación de un tercero, que combina las ventajas de ambos

VASIMR





Aún carecemos de las naves necesarias para aventurarse hasta distancias lejanas en la inmensidad del espacio. Con los cohetes químicos actuales, un viaje a Marte tardaría diez meses en una nave espacial limitada y vulnerable. Habría poco sitio para la carga útil. La mayor parte de la masa de la nave se ocuparía con el agente propulsor, que se gastaría en unas pocas igniciones breves, dejando que la nave se desplazase por inercia durante un largo tramo del viaje. Si se tuviese que viajar hasta Marte en estas condiciones, la tripulación se resentiría bastante. Los meses de exposición a la ingravidez debilitarían músculos y huesos, y la radiación persistente del espacio exterior dañaría el sistema inmunitario.

FRANKLIN R. CHANG DIAZ ha volado en cinco misiones espaciales. Durante las mismas se lograron el despliegue de la sonda Galileo hacia Júpiter, las dos primeras pruebas de acoplamientos espaciales y el anclaje final del transbordador en la Mir. Además de su carrera astronáutica y su investigación en plasma, ha trabajado en programas de salud mental y rehabilitación de dro-

Para que fuese segura, la nave interplanetaria tripulada debería ser rápida, fiable y capaz de interrumpir la misión en caso de fallo. Sus sistemas de propulsión han de estar preparados para abordar no sólo la fase de travesía, sino también las maniobras cerca de los planetas de origen y destino. Mientras la propulsión química puede continuar proporcionando un excelente medio de transporte desde la superficie hasta la órbita, se necesitan nuevas técnicas para enviar el hombre a los planetas y a las estrellas.

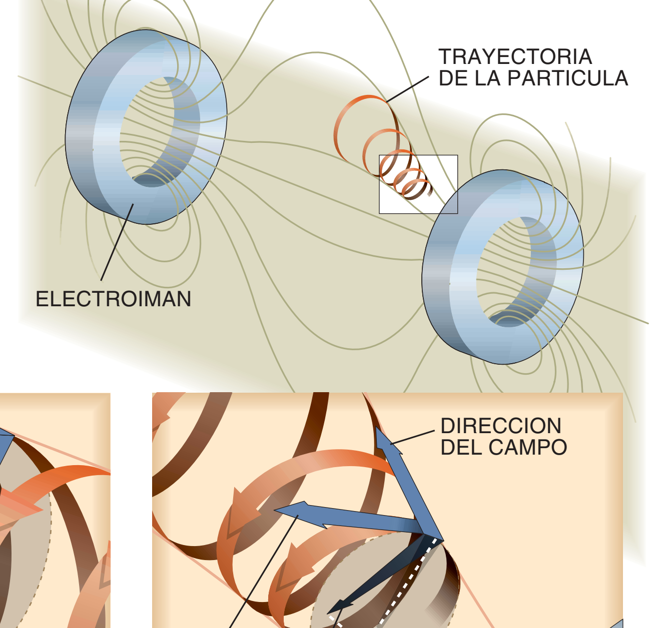
Los cohetes de plasma son una de estas técnicas. Usando gases ionizados acelerados por campos eléctricos y magnéticos, se aumenta su rendimiento mucho más allá de los límites del cohete químico. Mi equipo de investigación ha venido trabajando en esa dirección desde principios de los años ochenta. Se trata del Cohete de Magnetoplasma con Impulso Variable Específico (VASIMR). Su génesis se remonta a finales de los setenta, cuando estudiaba los conductos magnéticos y su aplicación a la fusión nuclear controlada. En estos conductos, un campo magnético aísla un plasma caliente de su superficie material más cercana, dejando que alcance temperaturas de cientos de millones de grados.

Avancé la teoría de que un conducto, con forma adecuada, podría crear una tobera magnética y convertir la energía del plasma en empuje para un cohete. Esta estructura funciona como una tobera de un cohete tradicional, pero puede soportar temperaturas mucho mayores. Posteriores investigaciones sugirieron que el sistema podría también generar gases de escape variables y adaptables a las condiciones del vuelo, del mismo modo que la transmisión de un automóvil adopta la potencia del motor a las peculiaridades de la carretera. Aunque la idea de gases de escape variables nació con los cohetes, su aplicación a los cohetes químicos con toberas de material estático se ha manifestado poco práctica. En el VASIMR la idea ha madurado lo suficiente para encarnarse en realidad.

El cohete de Newton

El principio de la propulsión por cohetes parte de la ley newtoniana de acción y reacción. Un cohete se impulsa a sí mismo expulsando material en dirección opuesta a su movimiento. Por lo común, el material es un gas calentado por una reacción química, pero el principio puede aplicarse también al movimiento de un aspersor de jardín.

2. ESPEJO magnético que atrapa las partículas de forma que se pueden calentar hasta 10 millones de grados kelvin. Consta de dos electroimanes anulares que establecen un campo magnético, dilatado entre ambos. En el VASIMR, un tercer imán extiende el espejo y proporciona una "tobera" magnética que expulsa las partículas.



3. CERCA DEL CENTRO del espejo, las líneas de campo corren paralelas, de forma que la fuerza magnética es radial. Las partículas viajan a velocidad constante con trayectoria helicoidal de radio casi constante.

4. CERCA DE CADA IMAN, las líneas de campo se inclinan. Entonces una componente de la fuerza expulsa del imán a las partículas. (Si éstas se mueven hacia el imán, se pueden detener e invertir su movimiento.) En esta zona, la hélice se estrecha.

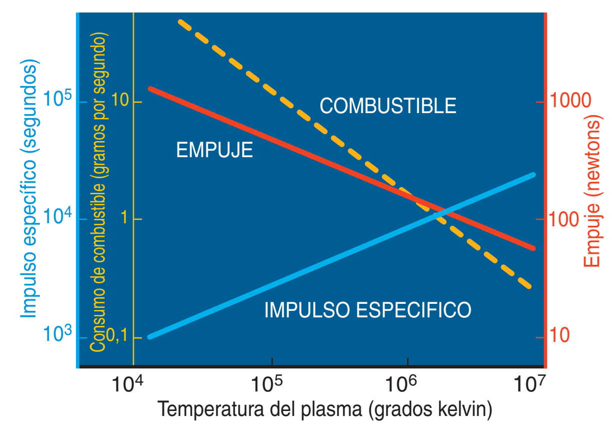
El empuje del cohete se mide en newtons y es el producto de la velocidad de los gases de escape (con relación a la nave) y la tasa de flujo del agente propulsor. Con bastante sencillez, se obtiene el mismo empuje expulsando más material a velocidad baja o menos a velocidad alta. Este último método ahorra combustible, aunque supone altas temperaturas de los gases de escape.

Para medir las prestaciones del cohete, los ingenieros recurren al impulso específico (I_{sp}), expresión que indica la velocidad de los gases de escape dividida por la aceleración de la gravedad al nivel del mar (9,8 metros por segundo por segundo). Aunque el empuje es directamente proporcional a I_{sp}, la energía necesaria para producirlo es proporcional al cuadrado del impulso I_{sp}. Por tanto, la energía necesaria para un determinado empuje aumenta linealmente con I_{sp}. En los cohetes químicos esta energía se origina en la reacción exotérmica del combustible y el oxidante. En otros casos, se debe impartir a los gases de escape por un calefactor del agente propulsor o acelerador. Estos sistemas dependen de una fuente de energía situada en otra parte de la nave. Suelen utilizarse paneles solares; mas la ingente demanda de energía que conlleva la exploración humana del espacio habrá de satisfacerse con reactores nucleares. Sobre todo en misiones allende Marte, donde la luz solar es relativamente débil.

En nuestra búsqueda de un alto rendimiento del combustible, y por tanto de un alto I_{sp}, mi equipo de investigación ha dejado de lado las reacciones químicas, en las que la temperatura es sólo de unos miles de grados kelvin, para ahondar en las posibilidades de la física de plasmas, donde las altas temperaturas arrebatan a los átomos algunos electrones, si no todos. La temperatura de un plasma comienza aproximadamente a 10.000 grados kelvin. En los laboratorios, sin embargo, ese guarismo puede multiplicarse por 1000. El plasma es una sopa de partículas dotadas de carga: iones positivos y electrones negativos. A estas temperaturas los iones, que constituyen la mayor parte de la masa, se mueven a velocidades de 300.000 metros por segundo, es decir, 60 veces más rápido que las partículas en los mejores cohetes químicos.

La producción de potencia del motor se mantiene adrede en un valor máximo, de forma que el empuje e I_{sp} son inversamente proporcionales. El aumento de uno de ellos siempre se hace a costa del otro. Por tanto, para el mismo agente propulsor, un cohete de alto I_{sp} desplaza una mayor carga útil que otro con bajo I_{sp}, pero en un tiempo más prolongado. Si un cohete pudiese variar el empuje e I_{sp}, podría optimizar el uso del agente propulsor y desplazar una carga útil máxima en un tiempo mínimo. Esta técnica de aceleración de potencia constante (CPT) es similar a la función de la transmisión de un automóvil al subir una cuesta o a la puesta en bandera de un motor de hélices al moverse a través del aire.

Para representarnos la CPT consideremos el modo en que la nave adquiere energía cinética procedente de los gases de escape. Si este proceso tuviese un rendimiento perfecto, las partículas de los gases de escape (vistas por un observador en tierra) dejarían la nave en reposo; la sonda se movería a la velocidad de los gases de escape. Toda la energía de



5. COMO EL CAMBIO DE MARCHAS de un automóvil, y a diferencia de otros cohetes, el VASIMR ajusta su potencia. Incrementando su temperatura, aumenta su impulso específico (*azul*) y reduce el consumo de combustible (*amarillo*), a costa de obtener menor empuje (*rojo*). La potencia de 10 megawatt es constante.



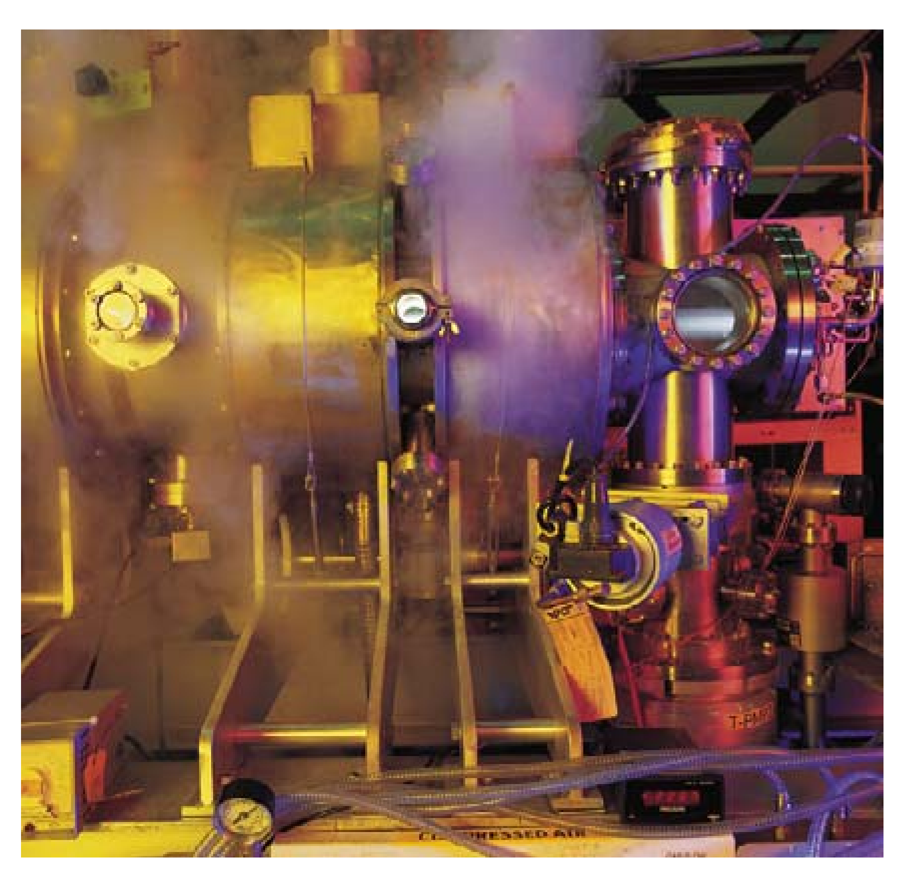
6. MIRANDO por el centro del cohete, se ve el plasma viniendo directamente hacia el observador. La ventana tiene un diámetro de 15 centímetros.

los gases de escape se habría comunicado a la nave. Así, en una nave lenta, los gases de escape lentos utilizan mejor la fuente de energía. Al acelerar la nave, gases de escape más rápidos (calientes), aunque en menor cantidad, dan mejores resultados. Aplicando la CPT, la nave comienza con un empuje alto para lograr una aceleración rápida. Al aumentar su velocidad, I_{sp} aumenta gradualmente y el empuje disminuye para economizar combustible. No ocurre otra cosa cuando un automóvil arranca en una marcha corta y va paulatinamente cambiando hacia marchas superiores.

Rebotando de atrás hacia delante

El VASIMR incorpora espejos magnéticos. El más sencillo está producido por dos electroimanes anulares donde la corriente circula en la misma dirección. El campo magnético, confinado cerca de los anillos, se ensancha en el espacio libre entre ambos. Las partículas cargadas se mueven helicoidalmente a lo largo de las líneas del campo, describiendo órbitas alrededor de ellas con un radio específico, el radio de Larmor, y a la frecuencia de ciclotrón. Como es de esperar, para un campo de una magnitud determinada, las partículas más pesadas (los iones) tienen menor frecuencia de ciclotrón y mayor radio de Larmor que las ligeras (los electrones). Además, los campos intensos producen una alta frecuencia de ciclotrón y un pequeño radio de Larmor. En el VASIMR, la frecuencia iónica de ciclotrón es de unos pocos megahertz (MHz), mientras que su equivalente para electrones está en el campo de los gigahertz.

La velocidad de las partículas consta de dos componentes: una paralela al campo (que corresponde al movimiento hacia delante a lo largo de la línea del campo) y la otra perpendicular (propia del movimiento orbital alrededor de la línea). Cuando una partícula se aproxima a un campo limitado (más intenso), aumenta su velocidad perpendicular, pero la paralela se reduce proporcionalmente para mantener constante la energía total. La causa de este fenómeno tiene que ver con la dirección de la fuerza ejercida por el campo sobre la partícula. La fuerza siempre es perpendicular a la velocidad de la partícula y a la dirección del campo. Cerca del centro del espejo, donde las líneas del campo discurren paralelas, la fuerza es radial y no ejerce pues ningún efecto sobre la velocidad paralela. Pero cuando la partícula entra en la restricción del campo, la fuerza la inclina hacia el exterior de esa zona, produciéndose un desequi-



7. ONDULANTES NUBES de vapor de agua surgen de los imanes, que se mantienen a la temperatura del nitrógeno líquido.

librio que decelera la partícula. Si la partícula está saliendo de la restricción, el campo produce el efecto opuesto y la partícula se acelera. Como no se ha sumado energía, la aceleración ocurre a costa del movimiento rotacional. El campo magnético no opera sobre la partícula; se limita a vehicular la transferencia de energía.

Estos sencillos argumentos se mantienen siempre y cuando la restricción del campo sea lenta y gradual comparada con el movimiento de la partícula, condición conocida como adiabaticidad. En su movimiento curvado alrededor de las líneas del campo, éstas guían a las partículas, que sólo pueden seguir las líneas que no se curvan abruptamente, de forma similar a lo que les sucede a los automóviles que corren raudos por una autopista resbaladiza.

Un espejo magnético puede atrapar partículas si, dada su lentitud, se reflejan en las restricciones del campo. Las partículas rebotan entre sí hasta que algo rompe su velocidad paralela de forma que supera la trampa o hasta que una de las restricciones se reduce. Con una velocidad paralela suficiente, la partícula pasará y se acelerará en el otro lado. Los cambios repentinos en la velocidad de una partícula atrapada, que pueden bastar para liberarla, se pueden producir por sucesos aleatorios (colisiones con otras partículas, interacción con ondas electromagnéticas, o inestabilidades de plasma y turbulencia). El campo magnético de la Tierra es un espejo natural. Las partículas cargadas de la ionosfera rebotan de un lado a otro entre los polos norte y sur. Algunas penetran en las profundidades de la atmósfera superior y crean auroras espectaculares. El VASIMR usa estas tres estructuras magnéticas, unidas conjuntamente: un inyector de plasma delantero, que ioniza el gas neutro; un amplificador de potencia central, que energiza el plasma; y una tobera magnética posterior, que lo expulsa hacia el espacio.

Dirigiendo la potencia

La mayoría de los cohetes de plasma necesitan electrodos físicos, que se erosionan en un ambiente hostil. Pero el VASIMR utiliza antenas de radio. Las ondas de radio calientan el plasma. Dos procesos de ondas entran en juego. Primeramente el gas neutro en la etapa del inyector se convierte en un plasma denso y, en términos relativos, frío (aproximadamente 60.000 grados kelvin) a través de la acción de ondas helicón; así se llaman las oscilaciones electromagnéticas a frecuencias de 10 a 50 MHz, que energizan los electrones libres de un gas en un campo magnético. Los electrones se multiplican rápidamente por la liberación de otros electrones desde los átomos cercanos en una ionización en cascada. Aunque no se dominan los pormenores del mecanismo, estas ondas gozan de extensa aplicación en la industria de semiconductores.

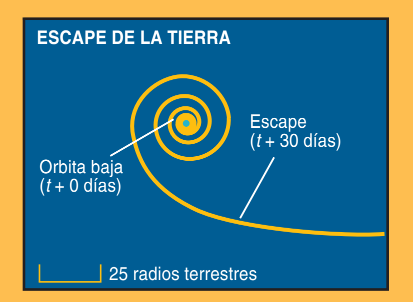
Una vez formado, el plasma fluye hacia la etapa central, donde se calienta por la acción adicional de otras ondas; que en este caso son oscilaciones iónicas de ciclotrón de frecuencia algo menor, cuyo nombre se debe a que resuenan con el movimiento rotacional natural de los iones. El campo eléctrico de la onda es perpendicular al campo magnético externo y gira a la frecuencia iónica de ciclotrón. La resonancia energiza el movimiento perpendicular de las partículas. Este efecto de calentamiento por resonancia iónica de ciclotrón (ICRH) se utiliza ampliamente en las investigaciones sobre fusión. La etapa central, por último, es la responsable del alto I_{sp} del cohete.

Alguien podría preguntarse por qué un aumento en el movimiento perpendicular de los iones puede impartir una cantidad de movimiento útil a los gases de escape del cohete. La respuesta reside en la física de la tobera magnética, la etapa final del VASIMR. El campo divergente transfiere aquí energía desde el movimiento perpendicular hacia el movimiento paralelo, acelerando los iones a lo largo de los gases de escape. En razón de su mayor masa, los iones arrastran consigo a los electrones, de manera que el plasma sale del cohete como un fluido neutro. En el VASIMR, esta expansión de tobera sucede en una distancia aproximada de 50 centímetros.

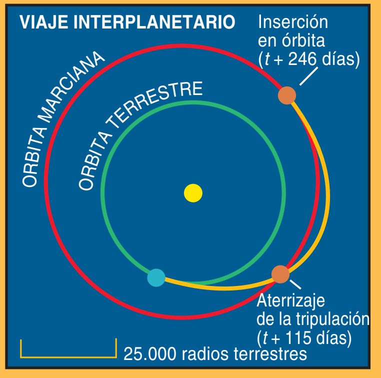
Acabada la expansión, el plasma ha de desprenderse del cohete. En trabajos recientes de Roald Sagdeev, de la Universidad de Maryland, y Boris Breizman, de la Universidad de Texas, hallamos descifrada la física básica. El modelo emplea la velocidad de Alfvén, así llamada en honor de Hannes Alfvén, físico sueco que la describió. Las perturbaciones en un plasma magnetizado se pro-

TRAYECTORIA DE MARTE

Para llegar hasta Marte, la nave debe liberarse de la gravedad terrestre. Usando una marcha baja (máximo empuje y un I_{sp} de 3000 segundos), el VASIMR toma velocidad.



A diferencia de los cohetes normales el VASIMR nunca va a la deriva. Cambia a marchas superiores, alcanzando un I_{sp} de 30.000 segundos a los 75 días de vuelo, y entonces comienza la deceleración.



Después de sobrevolar Marte para dejar a los astronautas, la nave va descendiendo en la órbita por sí misma.



El VASIMR puede regresar si algo va mal al principio del viaje.



pagan a lo largo del campo a esta velocidad. En una tobera magnética la velocidad de Alfvén desempeña un papel similar al de la velocidad del sonido en una tobera normal.

La transición del flujo subalfvénico al superalfvénico define un límite, trascendido el cual el flujo en dirección descendente no ejerce ningún efecto en la dirección opuesta, lo que asegura que el desprendimiento del plasma no oponga resistencia al cohete. La tobera del VASIMR expande el plasma superado este límite, hasta un punto donde el contenido de energía del campo es pequeño comparado con el del flujo de plasma. Entonces se libera el plasma, que arrastra consigo una pequeña cantidad del campo. Se supone que ocurre un fenómeno similar cuando las fulguraciones solares se desprenden del campo magnético del astro. El gasto energético en la distorsión del campo apenas incide en el rendimiento del cohete. El desprendimiento del plasma se produce uno o dos metros más allá de la garganta de la tobera.

División de la energía

La aceleración que caracteriza al VASIMR se logra cambiando la fracción relativa de energía dirigida a los sistemas de ondas helicón e ICRH. Para alto empuje, la energía se destina a la generación de ondas helicón produciendo más iones a velocidad menor. Para alto I_{sp}, se desvía más energía hacia el ICRH, con las consiguientes reducciones en empuje. Estamos estudiando otras dos técnicas de variación de los gases de escape, que incluyen un estrangulador magnético en la garganta de la tobera para alto I_{sp} y un posquemador de plasma para alto empuje con muy bajo I_{sp}.

Importa atender sobre todo al rendimiento del motor en el curso de su intervalo de funcionamiento. La creación de un plasma de hidrógeno cuesta unos 40 electronvolt por par ion-electrón. (El electronvolt, simbolizado por eV, es la unidad de energía de empleo habitual en física de partículas.) Este gasto de energía no está disponible para la propulsión; la mayoría de ella se aplica a la creación del plasma. A esa inversión inicial hemos de sumar la energía cinética de las partículas, generadora en última instancia del empuje. En el primer prototipo de VASIMR, para un alto I_{sp}, la energía cinética es aproximadamente 100 eV por ion; por tanto, un gasto total de energía de 140 eV produce 100 eV de energía útil, vale decir, un rendimiento de entorno al 70 por ciento. En el futuro, el VASIMR alcanzará energías de gases de escape de 800 a 1000 eV para la misma inversión inicial, obteniendo un rendimiento mayor. Para un bajo I_{sp}, cuando se genera más plasma para buscar un mayor empuje, la energía cinética se acerca a la energía de ionización, con las consecuentes reducciones en rendimiento. Pero el rendimiento habrá que evaluarlo en el contexto general de la misión. En ocasiones, unas breves ráfagas de alto empuje pueden ser el método más eficiente.

El gas de ionización trae consigo otros inconvenientes. Los átomos neutros que quedan en el plasma inicial causan pérdidas de potencia indeseables si permanecen mezclados con los iones energéticos. En un intercambio de carga, un átomo neutro frío cede un electrón a un ion caliente. El neutro caliente resultante no sufre la acción del campo magnético y se escapa, depositando su energía en las estructuras cercanas. El ion frío que deja atrás no sirve para nada.

Con el fin de salvar tal escollo, estamos estudiando una técnica de bombeo radial, en la que se expulsan los neutros fríos hacia fuera, antes de que merodeen en la etapa de amplificación de potencia. Se pueden inyectar nuevamente más abajo de la garganta de la tobera, donde los iones cursan ya en la dirección correcta y el intercambio de carga facilita que el plasma se desprenda del cohete. El intercambio de carga constituye una cuestión central de las investigaciones actuales sobre fusión.

Aunque los helicones ionizan casi cualquier gas, otras razones de índole práctica inclinan a optar por el hidrógeno y el helio, elementos ligeros. En ese sentido, el proceso de ICRH es más sencillo en gases ligeros, cuyas frecuencias de ciclotrón en campos razonables (aproximadamente de una tesla) son compatibles con la técnica de ondas de radio de alta potencia. Afortunadamente, siendo el hidrógeno el elemento más abundante en nuestro universo, cabe esperar que nuestras naves encuentren un amplio suministro de agente propulsor por doquier. En la generación de fuertes campos magnéticos se presenta otro importante desafío para la ingeniería. Estamos investigando nuevos superconductores de alta temperatura, basados en compuestos de

RICO EN ENERGIA

En el espacio la energía reviste una importancia capital. A punto estuvieron los astronautas del *Apolo 13* de perder la vida, en la primavera de 1970, de no haber sabido administrar la energía de sus baterías. Si su vuelo de regreso hubiese durado más tiempo, se hubiera producido una catástrofe. Los requisitos eléctricos del vuelo espacial tripulado están fijados por las necesidades básicas de supervivencia: transporte rápido y soporte vital. El transbordador espacial consume 15 kilowatt en órbita; la Estación Espacial Internacional, 75 kilowatt. Las estimaciones para un habitáculo en Marte se cifran entre 20 y 60 kilowatt, sin incluir la propulsión. Para una misión básica a Marte, un motor VASIMR necesitaría 10 megawatt. Una energía mayor significa viajes más rápidos. Con un VASIMR de 200 megawatt se llegaría al planeta rojo en 39 días.

Para las expediciones en el espacio inmediato a la Tierra, los combustibles químicos y los paneles solares proporcionan suficiente energía. Pero en el caso de Marte y más allá, los combustibles químicos ocupan demasiado volumen y los rayos solares resultan demasiado débiles. Un panel solar de 10 megawatt, por ejemplo, debería medir unos 68.000 metros cuadrados en Marte y 760.000 en Júpiter. Por mor de comparación, los paneles solares de la estación espacial son de 2500 metros cuadrados. Sólo hay un tipo de fuente energética capaz de llevar a cabo semejante hazaña: la energía nuclear.

La electricidad nuclear se ha venido obteniendo de "pilas nucleares", generadores termoeléctricos de radioisótopos (RTG), que cuentan con el calor generado por la desintegración radiactiva natural del plutonio. Estos dispositivos se han mostrado cruciales para las misiones espaciales robóticas, pero son muy poco eficientes para los vuelos tripulados. Sería mucho mejor un reactor nuclear, que emplea la fisión del uranio en una reacción en cadena. Para cada kilogramo de combustible, un reactor produce hasta 10 millones de veces más energía que un RTG.

Para medir el rendimiento de las fuentes de energía, los ingenieros espaciales se sirven de alfa, un parámetro que consiste en la relación entre la masa de la planta de energía en kilogramos y la producción eléctrica en kilowatt. Valores bajos de alfa corresponden a alto rendimiento y alta potencia. Los paneles solares actuales, que funcionan cerca de la Tierra, tienen valores de alfa de 20 a 100. Los RTG consiguen un alfa de 200. Sin embargo, los reactores de uranio tienen alfas de sólo 0,5.

Los reactores son más seguros que los RTG, porque el reactor y el combustible se pueden lanzar por separado y ensamblarse en una órbita lejos de la Tierra. Incluso los partidarios de la prohibición de la energía nuclear en órbita han reconocido su importancia para las misiones en el espacio lejano. —F.R.C.D.

óxidos de cobre, calcio, estroncio y bismuto. Para el enfriamiento de los imanes se recurrirá al agente propulsor de hidrógeno criogénico.

Desde los primeros experimentos del VASIMR, que comencé en los años ochenta con Tien-Fang Yang y otros en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, hemos llegado al actual programa de investigación. Nuestra pieza principal es ahora el prototipo VX-10 del Centro Espacial Johnson de la NASA en Houston. Dos líneas experimentales auxiliares se siguen en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge y la Universidad de Texas. Contamos también con colaboradores de la Universidad de Rice, el Laboratorio de Física de Plasma de Princeton, la Universidad de Michigan, la Universidad de Maryland y la Universidad de Houston, así como de industrias privadas y diversos centros de la NASA.

Nos hallamos en la fase de anteproyecto de ensayo del VASIMR en el espacio. Para mediados del año 2004 se prevé una nave espacial de 10 kilowatt alimentada por energía solar, que también estudiará los cinturones de radiación de la Tierra. En otro ensayo, el motor VASIMR intentará neutralizar la resistencia atmosférica ejercida sobre la Estación Espacial Internacional. Ciertos resultados experimentales recientes y el rápido progreso registrado en la miniaturización del equipo de radiofrecuencia avalan el éxito de estas pruebas en el espacio.

Una posible misión humana a Marte con VASIMR implica un sistema de 12 megawatt. La nave ascendería desde la Tierra en una espiral exterior de 30 días y viajaría a través del espacio interplanetario durante otros 85 días más, acelerando durante la mayor parte del recorrido y decelerando para la llegada a Marte. El viaje tardaría la mitad del tiempo invertido por cohetes químicos. Se desprendería un módulo de tripulación y aterrizaría usando cohetes químicos, mientras que la nave nodriza sobrevolaría el planeta en una trayectoria que economizase combustible para acoplarse de nuevo cuatro meses más tarde. Como protección de la tripulación humana, el vehículo a Marte estaría provisto, gracias a sus gases de escape variables, de una gran capacidad para interrumpir la misión. Su campo magnético y el propulsor de hidrógeno actuarían como escudo frente a la radiación.

El VASIMR podría convertirse en el precursor del sueño espacial: un cohete de fusión. Esta nave tendría de 10 a 100 gigawatt a su disposición. Aunque la fusión controlada persiste esquiva, los esfuerzos por domeñarla no han decaído. Las generaciones futuras la usarán para un rápido acceso a los planetas y misiones más lejanas. Ahora nos toca preparar las bases. En ello estamos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ELECTRICAL PROPULSION IN SPACE, Gabriel Giannini en *Scientific American*, vol. 204, n.º 3, páginas 57-65; marzo, 1961.

ION PROPULSION FOR SPACE FLIGHT. Ernst Stuhlinger. McGraw-Hill, 1964.

THE DEVELOPMENT OF THE VASIMR ENGINE. F. R. Chang Díaz y otros en *Proceedings of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, trabajo 99-102. Turín, Italia, 13-17 de septiembre, 1999. Para copias de este trabajo y el siguiente, visítese la página spaceflight.nasa.gov./ mars /technology/propulsion/aspl en la World Wide Web.

THE PHYSICS AND ENGINEERING OF THE VASIMR ENGINE. F. R. Chang Díaz, J. P. Squire, R. D. Bengtson, B. N. Breizman, F. W. Baity y M. D. Carter. American Institute of Aeronautics and Astronautics, trabajo de la conferencia 2000-3756; 17-19 de julio, 2000.

Fármacos antisida para Africa

Carol Ezzell
Fotografías de Karin Retieff/Trace Images



La paciente, una mujer guapa, de unos treinta años, con cabello liso y corto, recibe un sobre de plástico con unas cuantas píldoras. Lo guarda en el bolso. Al erguirse para darle a la asistenta social un abrazo agradecido, descubrimos la razón de su presencia en la clínica. Su vientre abultado revela un embarazo de ocho meses.

La asistenta, los médicos y las enfermeras del hospital de Khayelitsha, una aldea negra cercana a Ciudad del Cabo, son los únicos que saben que la mujer, llamémosla Millicent, está infectada con el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH). El padre de la criatura ha desaparecido de su vida y la madre de la paciente —a su cargo— se "moriría" si conociera su mal. Millicent teme decirlo a sus amigos. Si su secreto se filtrara, podrían matarla: dos días antes de que visitara la clínica, encontraron en Soweto a una mujer de 25 años muerta de un tiro en la cabeza y un papel sucio junto al cadáver donde se leía "tiene el sida". Y no ha sido el primer caso.

Pese al estigma y al secreto, Millicent confía en el futuro —al menos en el futuro de su hijo— gracias a ese saquito con cápsulas blancas de bandas azules, el fármaco antirretrovírico AZT. La mujer forma parte



De los 35 millones de personas infectadas con el virus del sida la mayoría vive en el continente africano, donde escasean los fármacos eficaces. ¿Qué debe hacer el mundo desarrollado?



1. LA ASISTENTA SOCIAL PATRICIA QOLO abraza a una paciente, "Millicent" (*vista de espaldas, a la izquierda*), tras explicarle cómo debe proteger al niño concebido para que no contraiga el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH). Millicent, seropositiva, vive en la zona de Khayelitsha (*arriba*) en las afueras de Ciudad del Cabo y participa en un programa piloto en el que recibe AZT (*izquierda, foto pequeña*) para prevenir la transmisión del VIH de madre a hijo.

de un programa piloto emprendido por Médicos sin Fronteras para repartir antirretrovíricos con los que prevenir la transmisión del virus de la madre al hijo concebido. La transmisión de madre a hijo constituye una de las claves principales de la pandemia de sida en Sudáfrica. Según un informe del Departamento de Salud de ese país, nueve de cada diez niños con VIH viven en el Africa subsahariana.

Los tratamientos con fármacos antirretrovíricos para prevenir esa vía de transmisión, intrauterina o en el parto, son práctica rutinaria en los países desarrollados. Médicos sin Fronteras se ha propuesto extenderla por toda Africa. Además, sólo un número mínimo de clínicas y hospitales de ese continente tienen medios suficientes para proporcionar medicinas antisida a hombres y niños infectados o a mujeres infectadas que no estén embarazadas.

El alto coste de los fármacos es un obstáculo decisivo que impide que los tratamientos del sida lleguen a zonas del mundo que, como Africa, los precisan con urgencia. Cinco laboratorios internacionales mantienen contactos con la Organización Mundial de la Salud (OMS) para conseguir la accesibilidad de las medicinas contra el sida para las naciones pobres. Las compañías Boehringer Ingelheim, Bristol Myers Squibb, Glaxo Wellcome, Merck & Company y Hoffmann La Roche han propuesto bajar los precios de los antirretrovíricos destinados a Africa en un 80 por ciento; para muchos, sin embargo, se trata de un esfuerzo mezquino y tardío.

No todos, sin embargo, ven en el precio de las medicinas la solución. "Ya me gustaría que el problema del tratamiento del sida fuera el coste excesivo", dice David E. Bloom, profesor de economía y demografía en la facultad de salud pública de la Universidad de Harvard. "El sida —agrega—, se encuentra en la intersección de algunas de las cuestiones más importantes de nuestros días", incluidas la pobreza, la globalización y la carencia de una infraestructura sanitaria.

Además del costo del fármaco están las pruebas necesarias para medir el éxito de los medicamentos antirretrovíricos en los pacientes y la comprobación de la aparición de resistencia vírica. Estas pruebas son caras, requieren visitas frecuentes al médico y pueden ser difíciles de ejecutar por los técnicos de laboratorio. Por no hablar de los contados jefes de estado subsaharianos que hayan promovido el uso de fármacos antirretrovíricos en su país. Thabo Mbeki, presidente de Sudáfrica, afirma todavía que el VIH no es la única causa del sida. Y sostiene que el AZT y otros antirretrovíricos resultan tóxicos para las mujeres embarazadas, pese a las investigaciones que han demostrado la reducción a la mitad de los episodios de transmisión y la irrelevancia de los efectos secundarios.

No se detienen ahí los obstáculos. La confusión reinante a propósito de una terapia antirretrovírica ampliamente extendida podría desanimar al buen samaritano de turno. ¿Quién va a preocuparse de los huérfanos si un país suministra sólo medicinas a unas madres que de cualquier modo morirán igual que los padres infectados? Y si la población subdesarrollada no toma las medicinas de una manera correcta, ¿no estarán tal vez incubando cepas resistentes de VIH que podrían abrirse camino en el mundo industrializado?

En un mundo real

Esas cuestiones son pura retórica en las chabolas de uralita y tablones sembradas a lo largo de la carretera que llega hasta Khayelitsha. Miles de personas viven en extrema pobreza allí, testigo del apartheid de antaño. Cada día arriban nuevas oleadas procedentes de zonas rurales. Levantan sus chozas mientras buscan trabajo en vano. El contagio vírico campa por sus respetos y sólo unos pocos afortunados pueden hacer algo en esa situación.

El AZT que ha recibido Millicent lo paga el gobierno sudafricano; se lo compra a Glaxo Wellcome a tres rand (unas 80 pesetas) por cápsula de 100 miligramos. En Occidente esa cápsula cuesta unas mil pesetas. Médicos sin Fronteras ha repartido ya el medicamento a 1400 mujeres encintas seropositivas de Khayelitsha. Todavía es pronto para determinar la eficacia del programa.

Otro fármaco, nevirapine, podría resultar tan eficaz como el AZT. Boehringer Ingelheim ha anunciado que lo suministrará gratis por un período de cinco años a las "economías en vías de desarrollo". Según estudios de esos laboratorios, el nevirapine (que se vende con el nombre comercial de viramune) redujo la tasa de transmisión de madre a hijo a un 14 por ciento en un grupo de 652 mujeres embarazadas. En una muestra similar de mujeres que tomaban una combinación de AZT y otro fármaco llamado 3TC, o epivir, se infectó el diez por ciento de niños nacidos.

El tratamiento con nevirapine requiere sólo tres dosis: dos para la madre (una cuando ya han comenzado los dolores del parto y otra al día o los dos días siguientes al parto) y una al recién nacido. Con AZT, por contra, se requiere una administración que dura meses. Hasta ahora, sin embargo, Sudáfrica —que tiene una de las proporciones más elevadas de sidosos del mundo— no ha aceptado la oferta de Boehringer Ingelheim, aunque el gobierno provincial de Cabo Occidental está aplicando el programa con AZT emprendido por Médicos sin Fronteras a cinco poblados más.

"Nosotros no creemos que el único camino para evitar la transmisión de madre a hijo sea la medicación antirretrovírica", objeta la ministra de Sanidad de Sudáfrica, Manto Tshabalala-Msimang. Su plan quinquenal se centra en la prevención, el tratamiento de las infecciones oportunistas y el apoyo a los cuidados domiciliarios. Sudáfrica y Namibia acaban de rechazar una oferta del Banco de Exportación e Importación de los Estados Unidos, dirigida a 24 países subsaharianos, de préstamos anuales de mil millones de dólares para comprar fármacos antisida. "Estamos sobrecargados de deudas", aducen.

La falta de entusiasmo del gobierno sudafricano por los fármacos antirretrovíricos contra la transmisión materno-filial no se entiende. Aun cuando Sudáfrica rechazó la donación de nevirapine, podría comprarla por unas ochocientas pesetas para cada mujer embarazada. La organización Campaña de Acción sobre el Tratamiento (CAT) ha presentado una querella para obligar al gobierno a proporcionar antirretrovíricos a las mujeres encintas seropositivas.

Pero el CAT está en contra de los fármacos exentos. Argumentan que los programas de los laboratorios farmacéuticos suelen ceñirse a un período breve e imponen restricciones en el uso. En esa línea ha mantenido conversaciones con Pfizer para convencer a la compañía de que rebaje el precio del fluconazole, medicina

TRES DIAS DE FARMACOS ANTIRRETROVIRICOS

Los 16 fármacos antirretrovíricos principales comercializados se usan en múltiples combinaciones, que dependen de si se trata de un primer tratamiento, de los efectos secundarios que el paciente ha experimentado y de otras condiciones que puedan presentarse. Las combinaciones de muchos fármacos revisten una eficacia mayor que uno o dos por separado. Abajo se presenta una selección de tres regímenes típicos. Se muestra el número de píldoras que una persona ha de tomar cada día en cada régimen. (Los análogos de los nucleósidos y los inhibidores no nucleosídicos de la transcriptasa inversa impiden que el VIH copie su material genético; los inhibidores de proteasa bloquean la producción de nuevas proteínas víricas.) —*C.E.*

REGIMEN 1
(tres píldoras dos veces al día)

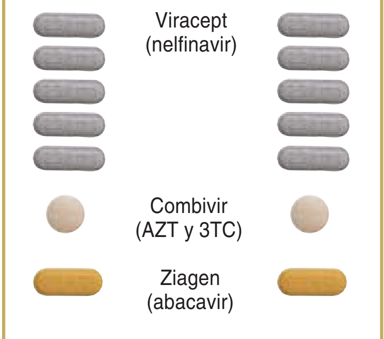
Zerit
(stavudine; d4T)

Viramune
(nevirapine)

Epivir
(lamidine; 3TC)

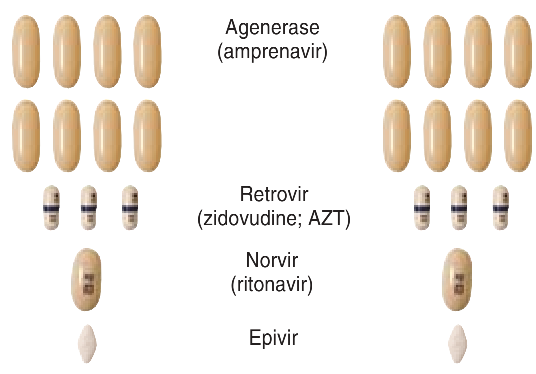
Un inhibidor de la transcriptasa inversa de naturaleza no nucleosídica (viramune) más dos análogos nucleosídicos.

REGIMEN 2
(siete píldoras dos veces al día)



Un inhibidor de proteasa (viracept) más tres análogos de nucleósidos. El viracept debe tomarse con una comida más o menos ligera.

REGIMEN 1
(trece píldoras dos veces al día)



Dos inhibidores de proteasa (agenerase y norvir) más dos análogos de nucleósidos. El norvir debe guardarse en el frigorífico. Se ingiere en la comida. Agenerase no debería tomarse con comidas ricas en grasa.

de una sola dosis para curar las infecciones vaginales por levaduras. Fluconazole, o Diflucan, no es antirretrovírico, pero sí resulta eficaz contra la meningitis criptocócica, una enfermedad potencialmente letal que afecta a enfermos de sida. Es también el fármaco de elección para el tratamiento del muguet, una infección de *Candida albicans* de la boca y esófago, que puede hacer difícil y dolorosa la deglución a algunos enfermos de sida.

Una dosis de 200 miligramos de fluconazole puede costar unas cuatro mil pesetas en Occidente, aunque los fabricantes del fármaco genérico en Tailandia pueden producirlo por 100 pesetas por dosis de tratamiento. Pfizer ha ofrecido suministrar el fármaco gratis a pacientes insolventes, pero sólo en Sudáfrica, y sólo para la meningitis criptocócica, no para el muguet. CAT se opone a las restricciones; sospecha que la compañía continuará donando el fármaco sólo hasta que expire la patente dentro de un par de años y que los pacientes tendrán entonces que pagar un precio incierto. De acuerdo con el deseo de CAT, los laboratorios Pfizer deberían conceder licencia a Sudáfrica para que importara fluconazole genérico. A ello repone Pfizer que asegurará que los pacientes reciban la medicina "todo el tiempo que la necesiten" y que la compañía "juzgará el éxito del programa al cabo de dos años".



2. LA ENFERMERA VALERIE SHOSHA extrae sangre a una mujer embarazada en la Unidad Obstétrica de Khayelitsha, cerca de Ciudad del Cabo, en una prueba rutinaria sobre difusión del VIH (*abajo*). La mujer, que resultó ser negativa, recibió consejos sobre cómo evitar la infección en el futuro. Si una mujer es positiva en la prueba inicial de barrido, el resultado se confirma con una segunda prueba (*derecha*), en la que los dos puntos azules indican la presencia de anticuerpos contra

Una prueba contagiosa

Mientras el debate sobre el fluconazole continúa, la India, Tailandia y Brasil fabrican versiones genéricas de antirretrovíricos, incluidos nuevos inhibidores de proteasa. Los inhibidores de proteasa bloquean una enzima que el VIH utiliza para romper una macroproteína precursora en unidades más pequeñas y que necesita para construir copias de sí mismo. En Occidente, un tratamiento de vanguardia contra el VIH comprende un inhibidor de proteasa, como el indinavir, más dos fármacos que, como el AZT, actúan cercenando la capacidad del VIH para copiar su material genético. Una tanda de este tratamiento cuesta unos 4000 dólares.

Los laboratorios farmacéuticos de la India y Brasil no se distinguen por respetar acuerdos sobre patentes. Pero EE.UU. ha optado por pasar por alto la exportación de fármacos contra el sida a naciones africanas allí fabricados. Además, el acuerdo internacional sobre Aspectos Relacionados con el Comercio de los Derechos de la Propiedad Intelectual (TRIPS) ofrece una vía a los países africanos para obtener legalmente versiones genéricas de fármacos antirretrovíricos. Según TRIPS, que pertenece a la Organización del Comercio Internacional, de la que forman parte 137 miembros, los gobiernos pueden aprobar leyes para suprimir la protección de las patentes del tratado y ofrecer "licencias" a compañías que operen dentro de sus fronteras. Aunque las compañías tendrían que pagar los derechos de uso a los propietarios de las patentes, en la mayoría de los casos el precio de venta de los productos será más económico.

Los laboratorios farmacéuticos luchan contra la idea de tales licencias domésticas, que atentan contra el sentido de las patentes, recortan el apoyo a la investigación y abren la puerta a un filibusterismo peligroso. Prefieren rebajar sus precios en un 80 por ciento.

David Berman, de Médicos sin Fronteras, desearía que las compañías vendieran las medicinas a precios ligeramente por encima del costo. Una reducción del 80 por ciento rebajaría el costo de una terapia de combinación para un año de unos 12.000 dólares a 2400, mientras que las mismas medicinas importadas del Brasil saldrían por unos 1000 dólares. No acepta el argumento de la calidad, ni la insistencia en que el abaratamiento del precio de los fármacos obstaculizaría la investigación de nuevas medicinas. "En este momento Africa representa sólo el 1 por ciento del mercado global farmacéutico" porque los medicamentos son muy caros. "Por eso una reducción de los precios aquí no debe afectar a la investigación."

La propuesta del 80 por ciento tampoco impresiona a la ministra Tshabalala-Msimang. "El presupuesto de mi departamento se cifra en dos mil millones de rand", afirma. Calcula que una reducción del 80 por ciento en una tanda típica de fármacos antirretrovíricos vendría a salir por unos 17.000 rand al año. Si destinara íntegro su presupuesto a la compra de medicinas, se beneficiarían sólo unos 120.000 individuos. Según los cálculos de su departamento, Sudáfrica tiene en la actualidad unos 4,2 millones de personas infectadas con el

VIH, más del 10 por ciento de la población.

Bloom, de Harvard, propone adecuar los precios según la riqueza del país y la formación de organizaciones de compra regionales de manera que las naciones pudieran adquirir las medicinas en bloque y negociar unos precios más convenientes. Los países ricos acabarían pagando la factura de investigación y desarrollo, mientras que los pobres abonarían sólo lo que cuesta fabricar el fármaco.

Más allá del precio de los fármacos

Pero el tratamiento del sida no se reduce a un problema de dinero. "Si todo dependiera de la accesibilidad de las medicinas, no les faltarían a ningún enfermo", sentencia Jeffrey Sturchio, director de Merck para Europa, Medio Oriente y Africa. Merck vende el inhibidor de proteasa indinavir con el nombre de crixivan. "El acceso a los antirretrovíricos es sólo parte de una situación endiabladamente compleja", corrobora Stefano Vella, presidente de la Sociedad Internacional del Sida y jefe del Programa de Investigaciones Clínicas sobre el VIH en el Instituto Nacional Italiano de la Salud en Roma.

Dada la facilidad de mutación que caracteriza al virus, un determinado grupo de antirretrovíricos puede terminar por resultar ineficaz para un individuo. Los pacientes deben someterse a pruebas para cambiar a otro régimen de fármacos cuando la cepa vírica infectante se ha hecho resistente. Hay que contar el número de células CD4 —las células inmunitarias que atacan el virus VIH— y determinar la carga vírica y la concentración de VIH en la sangre del enfermo.

Se trata de exámenes muy caros. En la India vienen a salir por unos 1000 dólares por paciente y año. Pero Praphan Phanuphak, del Centro de Investigación sobre el Sida de la Cruz Roja tailandesa, afirma que el control de la carga vírica es menos importante que lo que algunos han sostenido y que las pruebas sobre las células CD4 pueden realizarse de un modo más barato si se diluyen los reactivos de laboratorio necesarios.

Occidente dirige su atención a las pruebas sobre el genotipo, o constitución genética, y sobre el fenotipo, o la sensibilidad a diversos fármacos, de una cepa de VIH de una persona para determinar qué antirretrovíricos ejercerían en ella una acción más eficaz. Para establecer el genotipo hay que investigar si las muestras del VIH portan mutaciones que dotan de resistencia al virus contra ciertas medicaciones. La determinación del fenotipo, más difícil y cara, requiere el cultivo del virus en el laboratorio en presencia de una gama de fármacos para observar cuál es más eficaz. Pero los laboratorios de los países pobres carecen de la infraestructura, técnica y profesional, para realizar pruebas sobre células CD4 y carga vírica; no digamos ya para las determinaciones de genotipo o fenotipo.

No podemos esperar, claman desde Médicos sin Fronteras, a que los gobiernos africanos estén capacitados para realizar las pruebas sobre CD4 o carga vírica en cada hospital. Y estiman que la accesibilidad de los fármacos actuaría de palanca para presionar a las autoridades en la habilitación de equipos y personal. La Fundación Bill y Melinda Gates ha anunciado la donación de 50 millones de dólares para ampliar la infraestructura médica de Botswana.

Pegados al programa

Otro obstáculo para el uso generalizado de fármacos antirretrovíricos en Africa reside en la propia dificultad de la ejecución de los tratamientos indicados. En el régimen seguido en Khayelitsha para prevenir la transmisión materno-filial, la gestante ingiere tres píldoras de AZT dos veces al día durante los dos últimos meses del embarazo; cuando empieza a sentir los dolores del parto toma el fármaco cada tres horas. Mas, para combatir su propia infección de VIH con antirretrovíricos, tendría que consumir unas 26 pastillas cada día, durante años, según una pauta de dosificación rígida. Unas medicinas han de tomarse con la comida, otras con el estómago vacío; las hay que deben mantenerse a bajas temperaturas. Con el peligro añadido de que la omisión de una sola dosis puede bastar para que el virus se torne resistente al fármaco.

El cumplimiento de un régimen semejante exige una dura disciplina, aun cuando se disponga de abundante comida,

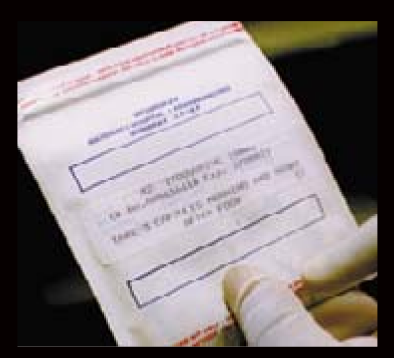
Comparación del costo de algunos fármacos contra el sida

Fármaco	Precio en EE.UU.	Precio en Sudáfrica	El "mejor" precio	Precio de EE.UU. como múltiplo del "mejor" precio
Didanosine (ddI; videx)	$1,80	$0,70	$0,50 (Brasil)	3,6×
Efavirenz (sustiva)	$4,40	$2,40*	$2,30 (Brasil)	1,9×
Fluconazole (diflucan)	$12,20	$4,10*	$0,30 (Tailandia; dosis de mantenimiento)	40,6×
Lamivudine (3TC; epivir)	$4,50	$1,10	$0,50 (India)	9×
Nevirapine (viramune)	$4,90	$3,00*	$2,10 (India)	2,3×
Stavudine (d4T; zerit)	$4,90	$2,50*	$0,30 (Brasil)	16,3×
Zidovudine (AZT; retrovir)	$1,70	$0,40	$0,20 (Brasil/India)	8,5×
Combivir (lamivudine más zidovudine)	$9,80	$1,50	$0,70 (Brasil)	14×

*El precio que el gobierno de Sudáfrica paga a las compañías farmacéuticas es mucho más bajo que el que cobra al sector privado.

FUENTE: Médicos sin Fronteras





3. BENJAMIN NTWANA, coordinador del programa de fármacos antivíricos en la Unidad Obstétrica de Khayelitsha, conversa con una paciente (*izquierda*). La mujer, que es positiva al VIH, recibió sobres de AZT (*abajo*) para que se medicara durante las últimas semanas del embarazo. Al bebé le harán la prueba a los 18 meses para determinar si el fármaco bloqueó la transmisión del virus.

agua limpia y electricidad para el frigorífico donde guardar los medicamentos. Si esa carga ya es difícil de soportar en los países ricos, a los pacientes del sur, con penuria de medios, les resultará pesadísima. En un simposio reciente sobre el sida, Papa Salif Sow, del Hospital Universitario de Dakar, consideraba un éxito que 64 de los 75 pacientes que trataba con fármacos antirretrovíricos tomasen el 80 por ciento de la medicación indicada. En la misma reunión, Silvio Aquino, del Departamento Municipal de Salud de Río de Janeiro, explicaba que sólo el 67 por ciento de los pacientes que él seguía acudieron con regularidad a las pruebas de células CD4, y sólo un 40 por ciento apareció para las pruebas de carga vírica.

Aunque no existen datos públicos sobre la prevalencia de la resistencia a los fármacos en Africa tras una terapia antirretrovírica, Christiane Adje, del Proyecto Retro-Ci en Abidjan, señala que de los 68 pacientes participantes en su programa de Iniciativa de Acceso a los Fármacos del Sida, dentro del Programa del Sida de las Naciones Unidas, 39 mostraron resistencia genotípica a los ocho meses y 25 desarrollaron resistencia fenotípica. (Resistencias genotípica y fenotípica pueden presentarse en el mismo paciente.) De lo que se infiere que está ya circulando una resistencia muy alta, antes de haberse logrado un reparto adecuado de las medicinas.

"No tenemos mucho tiempo para aplicar un enfoque sistemático y distribuir bien los antirretrovíricos en Africa; si no lo conseguimos, los pacientes se harán todos resistentes", advierte Eric Goemaere, director de la clínica Khayelitsha en las afueras de Ciudad del Cabo. De hecho, algunos de sus pacientes han tomado unas cuantas píldoras de antirretrovíricos que compraron esporádicamente en el mercado negro. Goemaere y sus colaboradores están organizando una red de médicos que prescriben antirretrovíricos. A medida que la gente se entere del programa de tratamiento habrá muchos más que decidan hacerse un análisis para saber si son seropositivos; Goemaere espera además que el rechazo y estigma por portar el virus disminuirán. "El año pasado el sida no existía en Khayelitsha. Ahora existe."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BEYOND OUR MEANS? THE COST OF TREATING HIV/AIDS IN THE DEVELOPING WORLD. Panos Institute, Londres, 2000.

SOMETHING TO BE DONE: TREATING HIV/AIDS. David E. Bloom y River Path Associates en *Science*, vol. 288, n.º 5474, págs. 2171-2173; 23 de junio de 2000.

Parece una historia de Víctor Hugo contada a Neil Simon: entre los acontecimientos que desembocaron en la primera reacción nuclear en cadena controlada, se hallan los encuentros accidentales de personajes de leyenda, en particular los de dos físicos muy distintos condenados a entenderse

La extraña pareja y la bomba

William Lanouette



En enero de 1939, en vísperas de la Segunda Guerra Mundial, Enrico Fermi y Leo Szilard, dos físicos que hasta entonces sólo se habían carteado, se conocieron casualmente en el Hotel King's Crown, próximo a la Universidad neoyorquina de Columbia. Era el principio de una colaboración tan intensa como conflictiva.

Fermi y Szilard habían abandonado Europa huyendo del fascismo y ambos poseían piezas esenciales y complementarias del rompecabezas que iba a permitir liberar la energía del átomo. Pronto se dieron cuenta, sin embargo, de que para trabajar juntos iban a tener que superar profundas diferencias personales y de estilo profesional. Si no hubieran perseverado, la primera reacción nuclear en cadena controlada no hubiera tenido lugar en 1942, a buen seguro, ni el Proyecto Manhattan hubiera culminado en la construcción de las primeras bombas atómicas en 1945. Szilard lo reconocía años después: "Si la nación debe agradecernos algo, es que trabajáramos juntos todo el tiempo necesario".

Vidas cruzadas

A los 38 años, Fermi acababa de llegar a Nueva York procedente de Roma vía Estocolmo, donde había recogido el premio Nobel de Física de 1938 por la creación de elementos más pesados que el uranio (los llamados transuránicos) mediante el bombardeo de uranio con neutrones. Fermi y su esposa, de origen judío, habían decidido no regresar a la Italia fascista y sí aceptar una de las cuatro ofertas que había recibido para trabajar en Estados Unidos, la de la Universidad de Columbia.

Leo Szilard, un judío húngaro de 40 años, había recalado en Nueva York siguiendo una ruta más tortuosa. En 1919 había abandonado su Budapest natal para estudiar y trabajar en Berlín junto a Albert Einstein. De esa relación inicial surgieron algunas ideas y varias patentes para una bomba de refrigeración electromagnética [*véase* "Los refrigeradores de Einstein y Szilard", por Gene Dannen; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo 1997]; dos décadas después, la amistad entre ambos adquiriría enorme significación histórica.

Szilard emigró a Londres cuando Adolf Hitler se hizo con el poder en Alemania en 1933. Ese mismo año concibió la idea de una "reacción en cadena" nuclear que, según una solicitud de patente de 1934, debía producir "energía eléctrica" y hasta "una explosión". Tales reacciones en cadena tendrían lugar en centrales de energía y en armas nucleares. Pero antes había que dar con un elemento capaz de sostener una reacción así. Cuando Szilard llegó a Columbia, llevaba cuatro años de experimentos fallidos en las universidades de Oxford, Rochester e Illinois.

Fermi era un físico brillante y riguroso, dedicado con intensidad a su profesión sin apenas tiempo para la política. Era un hombre hogareño que pronto dejó el hotel para trasladarse con su familia a una casa en las afueras de Nueva Jersey. Se levantaba a las 5:30 y dedicaba las dos primeras horas del día a pulir sus teorías y planificar los experimentos del día. Y es que, fenómeno harto excepcional entre los físicos del siglo XX, Fermi era un potente teórico que disfrutaba trabajando con las manos. Acabadas las clases, construía y manipulaba instrumentos junto a sus ayudantes de laboratorio.

Szilard investigaba por libre, sin adscripción a ningún laboratorio, apenas daba clases, publicaba de forma muy esporádica y no rehuía las incursiones en la economía y la biología. Soltero, vivía en hoteles y residencias de profesores, donde solía pasar horas cavilando en la bañera. (Declaraba que la Fundación Nacional para la Ciencia debería pagar a los científicos de segunda fila para que *no* investigaran.) Szilard era un ávido lector de periódicos que no cesaba de especular sobre asuntos económicos, políticos y militares, y que siempre tenía a punto dos maletas, presto a tomar el tren para huir de cualquier nueva erupción fascista. Le gustaba trabajar por la noche y sólo aparecía en la Universidad de Columbia a mediodía, para plantear todo tipo de cuestiones a sus colegas y sugerirles los experimentos que debían realizar. Isidor Isaac Rabi, a quien andando



1. LA TENSA COLABORACION entre Leo Szilard (*página opuesta, izquierda*) y Enrico Fermi (*derecha*) tuvo múltiples consecuencias, en las que se vieron envueltos Albert Einstein, el presidente Franklin D. Roosevelt y la construcción de la bomba atómica.

el tiempo se le concedería el Nobel de Física, solía decirle que tenía demasiadas ideas, para luego pedirle que le dejara en paz.

Bernard Feld, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), que fue ayudante de Szilard en Columbia y también trabajó con Fermi, resumió así el carácter de ambos: “Fermi no iba de A a B hasta que no lo sabía todo sobre A y tenía suficientes garantías sobre B. Szilard, en cambio, saltaba de A a D para luego preguntarse por qué perder el tiempo con B y C.”

Pocos días después de que Fermi y Szilard se encontraran fortuitamente en el Hotel King’s Crown, Niels Bohr llegaba a Nueva York con noticias frescas de Europa: según Lise Meitner, una física de origen judío que había huido de Alemania y se había instalado en Estocolmo, los químicos Otto Hahn y Fritz Strassmann, que trabajaban en Berlín, habían inducido la “fisión” del uranio mediante el bombardeo con neutrones. En otras palabras, habían desintegrado el átomo. En 1966 los tres recibieron el premio Enrico Fermi. Las explicaciones de Bohr permitieron a Fermi comprender mejor los experimentos con uranio que él mismo había realizado en 1934 y en los que, además de crear elementos transuránicos, había desintegrado átomos inadvertidamente.

Szilard se dio cuenta con preocupación de que el uranio era el elemento que podía alimentar la reacción en cadena descrita en su solicitud de patente de 1934. Llevado por su olfato político, Szilard había confiado la patente al Almirantazgo británico en secreto, a fin de no alertar a los científicos alemanes sobre la posibilidad de producir explosivos atómicos. El descubrimiento de la fisión confirmó los temores de Szilard: la bomba atómica iba a ser una realidad decisiva.

La idea de una reacción nuclear en cadena se le había ocurrido a Szilard mientras esperaba en una esquina de Londres, en 1933. No hacía más que un año que se había descubierto el neutrón, y los físicos concebían el átomo como un sistema solar en miniatura, en el que los electrones (cargados negativamente) orbitaban alrededor de un núcleo formado por protones (de carga positiva) y neutrones (carga neutra). Como el neutrón no tenía carga, podía penetrar en el núcleo con facilidad. Szilard pensó que, si un neutrón chocaba contra un núcleo, podía desintegrar el átomo, liberando la energía de enlace que lo mantenía unido. Durante el proceso se liberaría alguno de los neutrones del átomo, que a su vez chocaría con otro núcleo provocando una nueva desintegración. Si cada desintegración liberara más de un neutrón, el proceso crecería exponencialmente y millones de átomos se desintegrarían en fracciones de segundo, generando enormes cantidades de energía. (Szilard supo más tarde que las noticias de Bohr permitieron a Fermi concebir también una reacción en cadena, aunque Fermi la consideraba extremadamente improbable.)

Mientras Szilard solicitaba su patente, en 1934, Fermi se hallaba en Roma, decidido a convertirse en el mayor experto en el bombardeo del átomo mediante neutrones. Fermi se dio cuenta de que los neutrones perdían energía al atravesar un bloque de parafina, lo que aumentaba la probabilidad de que fueran absorbidos por el núcleo bombardeado. Los experimentos con uranio eran desconcertantes: unas veces el núcleo absorbía neutrones, pero otras el bombardeo con neutrones producía elementos totalmente nuevos. (Puesto que la identidad atómica depende del número de protones, la absorción de un neutrón sólo producía variantes más pesadas, o isótopos, del uranio.) Ida Noddack, química alemana que seguía las publicaciones del grupo de Fermi, sugirió que se analizaran químicamente las nuevas especies atómicas para comprobar si correspondían a los fragmentos de la desintegración del átomo. Pero Fermi, al que interesaba más la física de las colisiones y la absorción, no prestó atención a las implicaciones de los nuevos elementos. De haberlo hecho, habría reconocido la fisión nuclear algunos años antes que Meitner.

En la primavera de 1939, en Columbia, Fermi y Szilard intentaron cada uno por su lado comprender mejor los experimentos sobre fisión. Szilard compartió con el físico canadiense Walter Zinn una fuente de neutrones de radio-berilio que acababa de importar del Reino Unido, y que les permitió comprobar que cada fisión liberaba más de 2 neutrones. Fermi y su ayudante Herbert Anderson intentaron realizar un experimento similar usando una fuente de berilio-radón más intensa, pero no obtuvieron resultados concluyentes. Szilard advirtió que la fuente era demasiado intensa, lo que permitía a algunos neutrones atravesar el núcleo, complicando la distinción entre los neutrones procedentes de la fisión y los neutrones originales. Szilard cedió a Fermi su fuente de neutrones inglesa, y éste obtuvo con ella mejores resultados.

Los dos físicos intentaron entonces avanzar juntos, pero su manera de ser y de trabajar era muy distinta. Szilard prefería el trabajo mental al manual, mientras Fermi quería la participación activa de todos los miembros de su equipo en los experimentos. Los dos se respetaban pero les enervaba la presencia del otro. Como se necesitaban, pidieron al director del departamento de física de la Universidad de Columbia, George Pegram, que coordinara su trabajo. La diplomacia de Pegram consiguió unir

WILLIAM LANOUETTE se doctoró en ciencias políticas por la Escuela de Economía de Londres en 1973, con una tesis sobre el uso y abuso de la información científica por parte del poder legislativo y ejecutivo de Estados Unidos y Gran Bretaña. Actualmente trabaja en Estados Unidos como analista de política científica y energética para la Inspección General del Estado. Autor de una biografía de Leo Szilard, ha estudiado las relaciones de la política con los protagonistas del Proyecto Manhattan. Para la redacción de este artículo ha contado con la colaboración de Nina Byers, profesora de física en la Universidad de California en Los Angeles, y de Gene Dannen.



PATENT SPECIFICATION



630.726

Application Date: June 28, 1934. No. 19157/34.
" " July 4, 1934. No. 19721/34.

One Complete Specification left (under Section 16 of the Patents and Designs Acts, 1907 to 1946): April 9, 1935.

Specification Accepted: March 30, 1936 (but withheld from publication under Section 30 of the Patent and Designs Acts 1907 to 1932)

Date of Publication: Sept. 28, 1949.

Index at acceptance: —**Class 39(iv)**, P(1 : 2 : 3x).

PROVISIONAL SPECIFICATION
No. 19157 A.D. 1934.

Improvements in or relating to the Transmutation of Chemical Elements

I, LEO SZILARD, a citizen of Germany and subject of Hungary, c/o Claremont Haynes & Co., of Vernon House, Bloomsbury Square, London, W.C.1, do hereby declare the nature of this invention to be as follows:—

exceed the mean free path between two successive transmutations within the chain. For long chains composed of, say, 100 links the linear dimensions must be about ten times the mean free path.

I shall call a chain reaction in which

United States Patent Office

2,708,656
Patented May 17, 1955

1

2,708,656

NEUTRONIC REACTOR

Enrico Fermi, Santa Fe, N. Mex., and Leo Szilard, Chicago, Ill., assignors to the United States of America as represented by the United States Atomic Energy Commission

Application December 19, 1944, Serial No. 568,904

8 Claims. (Cl. 204—193)

The present invention relates to the general subject of nuclear fission and particularly to the establishment of self-sustaining neutron chain fission reactions in systems embodying uranium having a natural isotopic content.

Experiments by Hahn and Strassman, the results of which were published in January 1939, Naturwissenschaften, vol. 27, page 11, led to the conclusion that nuclear bombardment of natural uranium by slow neutrons causes explosion or fission of the nucleus, which splits into particles of smaller charge and mass with energy being released in the process. Later it was found that neutrons were emitted during the process and that the fission was principally confined to the uranium isotope U^{235} present as 1/139 part of the natural uranium.

2

is converted by neutron capture to the isotope 92^{239}. The latter is converted by beta decay to 93^{239} and this 93^{239} in turn is converted by beta decay to 94^{239}. Other isotopes of 93 and 94 may be formed in small quantities. By slow or thermal neutron capture, 92^{235}, on the other hand, can undergo nuclear fission to release energy appearing as heat and gamma and beta radiation, together with the formation of fission fragments appearing as radioactive isotopes of elements of lower mass numbers, and with the release of secondary neutrons.

The secondary neutrons thus produced by the fissioning of the 92^{235} nuclei have a high average energy, and must be slowed down to thermal energies in order to be in condition to cause slow neutron fission in other 92^{235} nuclei. This slowing down, or moderation of the neutron energy, is accomplished by passing the neutrons through a material where the neutrons are slowed by collision. Such a material is known as a moderator. While some of the secondary neutrons are absorbed by the uranium isotope 92^{238} leading to the production of element 94, and by other materials such as the moderator, enough neutrons can remain to sustain the chain reaction, when proper conditions are maintained.

Under these proper conditions, the chain reaction will supply not only the neutrons necessary for maintaining the neutronic reaction, but also will supply the neutrons for capture by the isotope 92^{238} leading to the production of 94, and excess neutrons for use as desired.

2. LA PATENTE concedida a Szilard en Inglaterra por la idea de una reacción en cadena fue asignada al Almirantazgo británico y permaneció en secreto hasta el final de la guerra. Fermi y Szilard obtuvieron conjuntamente la patente estadounidense por el primer reactor nuclear.

la precisión de Fermi y la perspicacia de Szilard. Con la ayuda de Anderson, los colegas rivales establecieron que mediante neutrones lentos "se podía sostener una reacción nuclear en cadena".

Construyendo la cadena

Las colisiones entre Fermi y Szilard se producían a diario, pero las colisiones entre neutrones y núcleos eran en un comienzo muy raras. El paso de los neutrones a través de un moderador, como la parafina de Fermi, los frenaba, lo que favorecía el choque posible con un núcleo. En 1939 se sabía ya que el "agua pesada" era un moderador eficaz. El agua normal, o "agua ligera", está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, como indica la fórmula familiar H_2O. En el agua pesada, el oxígeno está combinado con un isótopo pesado del hidrógeno, el deuterio. (El agua pesada, D_2O, se usa todavía como moderador del combustible de uranio natural en los reactores nucleares, mientras que el agua ligera se usa con combustible de uranio enriquecido.) Pero el agua pesada era cara y escasa, y los experimentos a gran escala concebidos por Szilard precisaban un moderador más asequible. Szilard descubriría uno que los científicos alemanes habían despreciado.

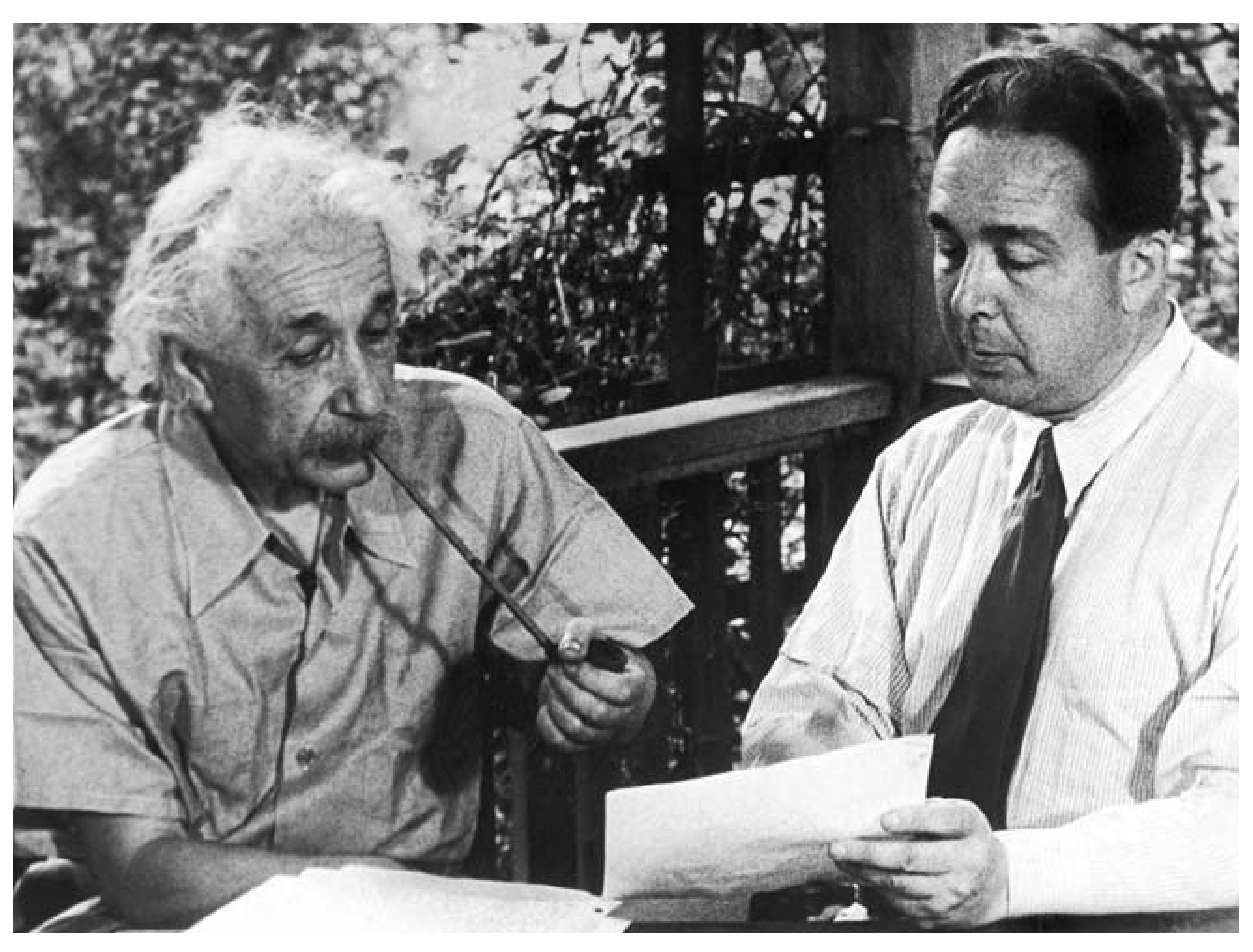
Como temía Szilard, en la primavera de 1939 los alemanes investigaban ya la posibilidad de una bomba atómica. Los físicos americanos y alemanes sabían que el grafito —la forma blanda de carbón de la mina del lápiz— podía actuar como moderador. Pero los alemanes lo descartaron porque absorbía demasiados neutrones; se concentraron en el agua pesada, un bien escaso. Szilard, que tomaba el tren hasta Boston o Búfalo para procurar a Fermi los materiales que requerían sus experimentos, se dio cuenta de que el grafito comercial contenía pequeñas cantidades de boro, un elemento que absorbe neutrones vorazmente. Por ello encargó que le suministraran grafito sin boro, un grafito hecho a medida que sería motivo de controversia entre Fermi y Szilard.

Anderson midió la absorción de neutrones en grafito puro y encontró que, efectivamente, podía ser un buen moderador. Szilard sugirió que el resultado del experimento fuera secreto, pero Fermi, profesional puro, no quería de ningún modo romper con la tradición académica de publicar en una revista con revisión por pares. Szilard explicaría después que Fermi "se enfadó de verdad; creía que mi idea era absurda". Gracias a la intercesión de Pegram, Fermi aceptó la autocensura impuesta por las circunstancias.

Fermi vio en el moderador de grafito un rayo de esperanza para una reacción nuclear que se sostuviera por ella misma, pero discrepaba de Szilard sobre la posibilidad de obtener la reacción a corto plazo. Szilard temía que los alemanes anduvieran por delante en la carrera de armamento nuclear, pero Fermi no creía que pudiera construirse una bomba antes de 25 o 50 años y explicaba a sus colegas que la posibilidad de sostener una reacción en cadena era "remota", del orden de un 10 %.

Isidor Rabi le respondió que "un 10 % no es una posibilidad remota cuando se trata de la muerte". Szilard observó que él y Fermi interpretaban la misma información de manera muy distinta. "Lo dos éramos conservadores, aunque en planos distintos: mientras Fermi prefería estimar a la baja la probabilidad de construir una bomba, mi cautela conservadora consistía en dar por hecho que sería construida y que había que tomar las debidas precauciones."

Entre las precauciones tomadas por Szilard se hallaba la de conseguir 2000 dólares para el proyecto de investigación de Fermi. Con todo, en



3. EINSTEIN Y SZILARD repasan la carta que convencerá a los Estados Unidos de la necesidad de desarrollar armas nucleares. Esta fotografía recrea el encuentro de ambos físicos, y fue tomada en 1946 para la película *Atomic Power*.

el verano de 1939 Fermi mostró su relativa falta de interés por las implicaciones de la investigación nuclear al dejarla de lado para estudiar la radiación cósmica en la Universidad de Michigan. El primer reactor nuclear no fue diseñado en un laboratorio o una biblioteca, sino por correspondencia.

De forma característica, Szilard quería emprender experimentos "a gran escala inmediatamente", ante el escepticismo de Fermi. Szilard propuso disponer el grafito y el uranio en una retícula, de forma que la geometría definiera la dispersión de neutrones y el número de fisiones. Fermi era partidario de mezclar el grafito y el uranio, una sugerencia que sacó de quicio a Szilard, convencido de que Fermi prefería esta configuración homogénea sólo porque facilitaba los cálculos. Fermi acabaría aceptando la disposición reticular de Szilard y aplicando toda su inventiva a la determinación de sus propiedades físicas y a la coordinación del personal necesario para construir un reactor.

Amistades poderosas

Szilard era consciente de que su talento y el de Fermi no les eximía de la necesidad de encontrar buenos aliados para su proyecto. Acabarían recibiendo ayuda de un trío inimaginable: Franklin D. Roosevelt, J. Edgar Hoover y Albert Einstein.

Durante el verano, llegó a oídos de Szilard que Alemania estaba restringiendo los suministros de uranio, lo que interpretó como prueba de que se investigaba sobre la fisión. Queriendo alertar al gobierno federal, y con su instinto para las relaciones públicas, se dirigió a su amigo y mentor Einstein, que vivía en una casa de verano en Long Island, 70 millas al este de la ciudad de Nueva York. Szilard le habló de la reacción en cadena, a lo que Einstein respondió que "nunca había pensado en ello"; por fin aparecía un mecanismo que haría realidad la conversión entre masa y energía, su ecuación más famosa.

Szilard visitó dos veces a Einstein, la segunda para hablar de una carta que quería que firmara. El conductor que le llevó a la segunda cita, un científico húngaro refugiado en los Estados Unidos, explica: "Szilard hacía casi de todo, excepto conducir un coche, y yo tenía uno, así que le llevé a la casa de veraneo... Einstein era un demócrata, ya que no sólo invitó a Szilard a café, sino también a su conductor". Así fue como Edward Teller asistió al encuentro con Einstein, quien, vistiendo un traje viejo y zapatillas, leyó y firmó una célebre carta al presidente Roosevelt. La carta, fechada el 2 de agosto de 1939, empezaba refiriéndose a "los trabajos recientes de Fermi y Szilard...". La misiva advertía de la posible existencia de un proyecto de investigación alemán para la construcción de armas atómicas, y urgía al presidente a crear un proyecto propio en los Estados Unidos.

Szilard pasó la carta al inversor y banquero Alexander Sachs, un asesor del *New Deal* con acceso franco al presidente. La Segunda Guerra Mundial estalló en septiembre, y cuando Roosevelt recibió la carta, en octubre, estuvo de acuerdo en que debía hacerse algo "para evitar que los nazis acaben con nosotros". Para ello, el presidente creó un Comité Federal del uranio, del que formaban parte Szilard y otros científicos emigrantes. En pocas semanas reunieron 6000 dólares para la investigación en Columbia.

Después de la guerra, Einstein diría que él sólo "había actuado como mensajero" de Szilard. En 1940, sin embargo, Einstein se vio obligado a desempeñar una vez más un papel decisivo, cuando el ejército estadounidense estuvo a punto de negar a Fermi y a Szilard las credenciales de seguridad. Los militares, basando sus conclusiones en información suministrada por "fuentes de toda confianza", llegaron a conclusiones contradictorias. Por un lado Fermi, un refugiado del fascismo, era "sin duda un fascista"; por otro Szilard, que sentía terror de los nazis, era "muy pro-alemán". Las advertencias de Szilard, en el sentido de que Alemania podía ganar la guerra, explican la segunda confusión. (El informe recogía dos versiones distintas del nombre de Szilard, las dos incorrectas.) El ejército desestimó "la participación de estas personas en trabajo secreto", pese a que el único trabajo secreto que había entonces en los Estados Unidos estaba en las mentes de Szilard y Fermi.

Si se hubieran seguido las recomendaciones del informe, los fondos se habrían agotado y la investigación de Fermi y Szilard no habría superado el estado embrionario. Tal error no llegó a cometerse porque la Casa Blanca ordenó a la Oficina Federal de Investigación (FBI) que "verificara su lealtad a los Estados Unidos". El director del FBI, J. Edgar Hoover, hizo que sus agentes entrevistaran a Einstein (cuya lealtad sería posteriormente cuestionada debido a sus opiniones pacifistas). La palabra de Einstein consiguió que los fondos federales llegaran a Columbia a partir de noviembre de 1940, aunque las sospechas sobre Fermi y Szilard sólo desaparecieron años después, cuando adquirieron la nacionalidad estadounidense.

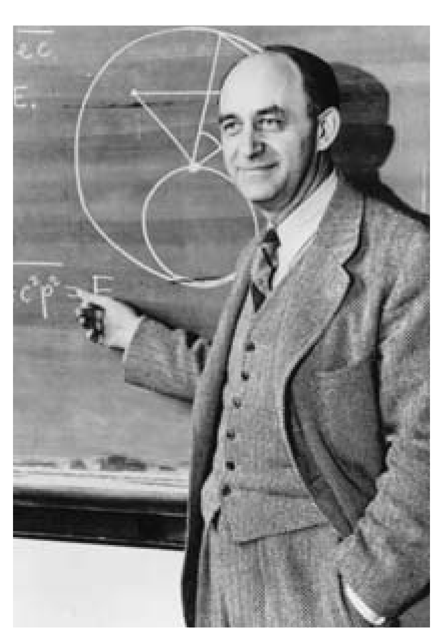
Con el presupuesto asegurado, el equipo de Fermi empezó a trabajar sistemáticamente en la construcción de "pilas" de uranio y grafito (la retícula de Szilard), con la intención de comprobar la proporción y la geometría óptimas para una reacción en cadena. La víspera del día del ataque japonés a Pearl Harbor, el presidente Roosevelt adoptó el compromiso de financiar con fondos federales la investigación sobre la bomba A. En la primavera de 1942, Fermi, Szilard y el equipo de la Universidad de Columbia se trasladaron a la Universidad de Chicago, donde establecieron un "laboratorio metalúrgico" altamente secreto para investigar las reacciones en cadena. El Proyecto Manhattan del ejército asumió el control de la investigación en junio de 1942. No deja de resultar irónico que en ese preciso momento histórico Alemania ralentizara su propio proyecto nuclear, convencida de que la bomba A no llegaría a tiempo para alterar el curso de la guerra.

En otoño de 1942 se construyó una pila con esferas de uranio rodeadas de grafito. El 2 de diciembre de 1942, en una pista de squash situada bajo el Stagg Field, el campo de rugby de la universidad, Fermi dirigió el experimento que inició la primera reacción nuclear en cadena bajo control y sostenible del mundo. Al acabar el histórico experimento, Fermi y Szilard se quedaron solos junto al reactor y se estrecharon las manos. Szilard recuerda que le dijo: "Este día pasará como un día negro a la historia de la humanidad".

De las diferencias a la armonía

Hacia el final de la guerra, en 1945, Fermi y Szilard discreparon una vez más. Szilard había promovido la construcción de la bomba A como un arma de defensa contra Alemania; con la derrota de Hitler no debía usarse el arma nuclear contra Japón, sólo tenía que demostrarse su potencia para forzar la rendición. Fermi, asesor científico del comité de la administración que discutía las distintas opciones de uso de la bomba, creía que una demostración no sería suficiente. La administración estuvo de acuerdo con esta opinión, y en agosto las ciudades de Hiroshima y Nagasaki fueron arrasadas.

Acabada la guerra, Fermi se mostró partidario de dejar que el ejército siguiera controlando la investigación nuclear, mientras Szilard conseguía que el Congreso creara una nueva Comisión para la Energía Atómica, de carácter civil. En 1950 los dos hombres hicieron causa común de su oposición a un viejo amigo de Szilard,



4. EL PREMIO NOBEL FERMI era un teórico brillante y un experimentalista inspirado, algo que se puede decir de muy pocos físicos del siglo XX.

Teller, objetando al desarrollo de la bomba de hidrógeno, descrita por Fermi como "un arma que sólo sirve, en la práctica, para el genocidio".

En 1955, un año después de la muerte de Fermi, se publicó una patente conjunta del "reactor de neutrones" de Fermi-Szilard. Szilard se interesó por la biología molecular y el control de las armas nucleares hasta su muerte en 1964. Fermi resumió el carácter de Szilard diciendo que era "extremadamente brillante", pero también alguien "que parece disfrutar provocando a la gente". Por su parte, Szilard escribió sobre Fermi: "Cuando más me gustaba era en las raras ocasiones en que perdía los nervios (excepto cuando yo era la causa, naturalmente)".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ENRICO FERMI: COLLECTED PAPERS. 2 vols. University of Chicago Press, 1962 y 1965.

COLLECTED WORKS OF LEO SZILARD. 3 vols. MIT Press, 1972, 1978 y 1987.

GENIUS IN THE SHADOWS: A BIOGRAPHY OF LEO SZILARD, THE MAN BEHIND THE BOMB. William Lanouette (con Béla Szilard). University of Chicago Press, 1994.

ENRICO FERMI, PHYSICIST. Reimpresión. Emilio Segrè. University of Chicago Press, 1995.

PERFILES

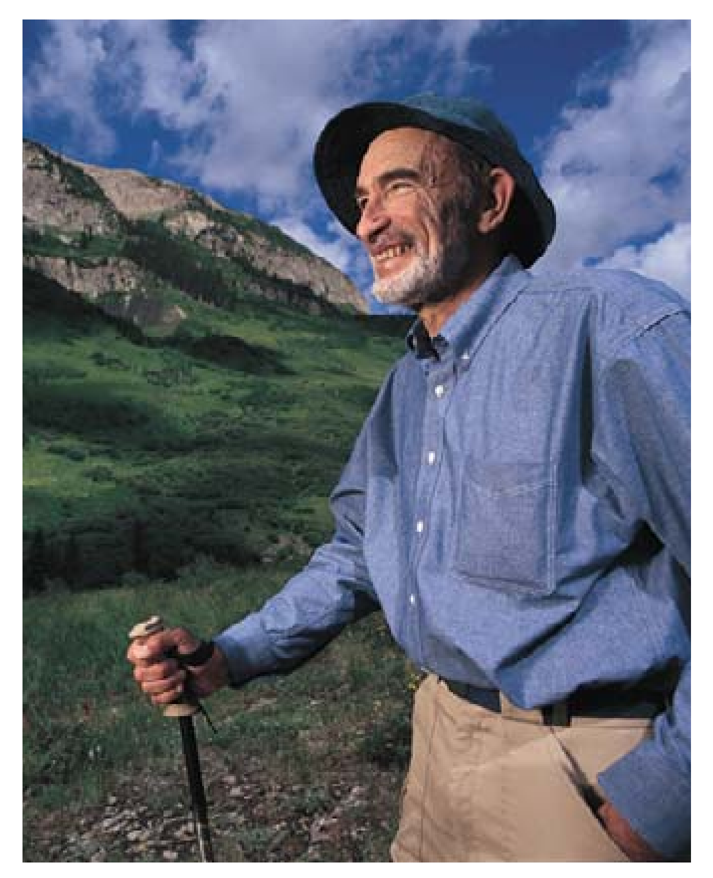
Julie Lewis

PAUL R. EHRLICH: ¿Somos demasiados?

Copper Creek Valley (Colorado).— Hace un momento Paul R. Ehrlich y yo estábamos al sol en un prado de las Montañas Rocosas cubierto de flores silvestres, hablando del ciclo reproductor de las mariposas. Y ahora nos apuramos montaña abajo en medio de un aguacero que nos cala hasta los huesos. Sin que Ehrlich se diese cuenta, se habían formado unas nubes negras. Cuando el locuaz profesor se enfrasca en una conversación, poco importa el resto, y además Ehrlich está acostumbrado a encontrarse en plena tormenta.

Durante decenios, las premoniciones sobre una inminente catástrofe ambiental le han granjeado a este ácido biólogo de la Universidad de Stanford no pocas enemistades. Para sus incondicionales, es un intrépido cruzado que ha utilizado su considerable encanto y su formidable agudeza verbal para transmitir al público un mensaje importante, aunque resulte difícil de digerir. Para sus adversarios, tan firmes como sus amigos, anda buscando la publicidad de los medios de comunicación y no es sino un profeta de desgracias que, pese a sus estrepitosas y frecuentes equivocaciones, nunca las admite. Su crítico más vehemente, Julian L. Simon, era un apasionado defensor de la idea de la capacidad indefinida de la Tierra para sustentar el desarrollo. Miembro del conservador Instituto Cato, Simon acusó repetidas veces a Ehrlich de "acaudillar la histeria ecologista". Y éste, que no suele andarse por las ramas, le espetó: "Lo único que no se acabará nunca son los imbéciles".

Ehrlich irrumpió en la palestra en 1968 con un escuálido volumen titulado *The Population Bomb*. Predecía que la superpoblación llevaría muy pronto a una hambruna de escala gigantesca. Con la pretensión de influir en las inmediatas elecciones presidenciales (una idea que le hace ahora sorprenderse de su propia ingenuidad), tamaño manifiesto maltusiano contenía escenarios posibles del caos que se avecinaba. Se anunciaba una misteriosa pandemia vírica de origen animal procedente de las menguantes selvas de la superpoblada Africa, lo que hoy parece desgraciadamente confirmado. Pero vaticinaba también un Japón famélico y unos Estados Unidos con cartilla de racionamiento. Y en eso erró el pronóstico.



El libro parecía esperarse. Vendió la friolera de tres millones de ejemplares. Ehrlich salió en programas populares de televisión y reveló ante las cámaras que se había hecho la vasectomía. Su proselitismo contribuyó a galvanizar la acción internacional contra la superpoblación y el hambre. "Fue él quien atrajo la atención de todo el mundo sobre este problema", dice John Bongaarts, vicepresidente de política investigadora del Consejo de la Población en Nueva York. Pero como reconoce Bongaarts, "las predicciones de Paul Ehrlich sobre las grandes hambrunas no se han verificado".

De hecho, aunque demasiada gente continúa pasando hambre, hoy día su número es menor que cuando se escribió *The Population Bomb*. La Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas estima que el número de gente con desnutrición crónica en los países subdesarrollados descendió de 900 millones en 1969-1971 a 800 millones en 1988-1990. La cifra ronda los 790 millones, según las últimas estimaciones. Mientras que la población mundial ha crecido enormemente, alcanzando los seis mil millones, el porcentaje de personas malnutridas ha descendido. El apasionado profesor subestimó el impacto de la "revolución verde", dice Per Pinstrup-Andersen, del Instituto de Investigación Internacional sobre Política Alimentaria: "No creo que Paul Ehrlich entendiera, y no estoy seguro de que nunca alguien haya entendido, las posibilidades de la investigación agrícola para aumentar la productividad de la agricultura".

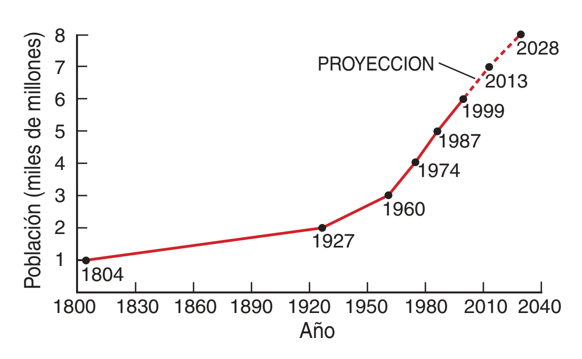
Eso no frenó a Ehrlich, que saltó del crecimiento de la población a un elenco de cuestiones preocupantes sobre el entorno: proliferación de armas nucleares, biodiversidad, contaminación y calentamiento global. Pero sus críticos, partidarios algunos de dejar que las cosas prosigan su curso, continuaron a la carga, y en 1980 se convirtió en un blanco fácil. Junto con amigos que compartían sus ideas aceptó una apuesta que se hizo famosa, contra Simon —economista del libre mercado— y se jugaron que los precios de cinco metales habrían subido en 1990

como consecuencia de la escasez. Pero no ocurrió tal, sino que los precios bajaron, y Simon ganó limpiamente la apuesta. Ehrlich se defendió en un osado libro de 1998, *Betrayal of Science and Reason*, que una recesión en la primera mitad del decenio había hecho bajar los precios, pero el *New York Times*, en un artículo sobre la apuesta que sentó cátedra, le otorgó el mérito a "la mentalidad empresarial y los adelantos de la técnica". Los plásticos reemplazaron a los metales. Los satélites y los cables de fibra óptica reemplazaron los tendidos de cobre. El aluminio reemplazó al estaño.

Ahora, tras 30 años de vida pública y de rifirrafes, Ehrlich sigue sin arrepentirse. Ciertamente, el libro tenía sus errores, reconoce, pero replica: "muéstreme un científico suficientemente viejo como para escribir algo en 1968 y que vuelva a escribir lo mismo hoy día y le mostraré un idiota". La bomba aún está activada, dice. "Nos encontramos en medio de una explosión". Y la deceleración del ritmo de crecimiento no le resulta de gran alivio. "Las explosiones no aceleran por siempre; parece que hemos pasado el pico pero el crecimiento es aún muy rápido en términos históricos", reitera. Si la hipótesis de que la población puede alcanzar su máximo de unos diez mil millones en 2050 se cumple, la población será aún demasiado grande. "Si eso sucede, se añadirá a la población del planeta mucha más gente de la que existía cuando se escribió *The Population Bomb*, dos veces más de la que ocupaba la tierra cuando yo nací. Y la persona media que se añada constituirá una amenaza mucho mayor para los sistemas que sostienen la vida, un consumidor más voraz que la persona media de 1932".

A Ehrlich le saltaron las alarmas de la amenaza ambiental siendo todavía un adolescente de Nueva Jersey que coleccionaba mariposas, cuando fue testigo de cómo los constructores destruían su hábitat y los plaguicidas obstruían sus intentos de criar orugas. Mientras trabajaba en su doctorado en la Universidad de Kansas, estudió biología evolutiva y el proceso de selección por el cual los insectos desarrollan la resistencia al DDT. En 1959 entró en el claustro de Stanford, donde investigó la ecología y la evolución de la población local de mariposas de manchas a cuadros y se pasó un decenio intentando impedir que la universidad subdividiera los campos de las mariposas para construir alojamientos.

Apoyado en los lepidópteros realizó significativas contribuciones a la biología evolutiva, particularmente la teoría de la coevolución, que desarrolló con su amigo y colega Peter H. Raven, actual director del Jardín Botánico de Missouri en St. Louis. Estudiaron las interrelaciones entre las mariposas y las plantas de que se alimentaban sus orugas, encontrando que las plantas evolucionan para burlar a sus depredadores y que las mariposas evolucionan a su vez para evitar las defensas de las plantas. Esta teoría es ahora crucial para entender la creciente resistencia de los insectos a los plaguicidas. Entre sus logros se cuentan una multitud de premios, la elección a la Academia Nacional de Ciencias y la autoría o coautoría de casi 40 libros.



Momento de la explosión: Algunas estimaciones vaticinan que el listón de los diez mil millones se alcanzará hacia el año 2050 en vez del 2183

Con todo, por lo que es más conocido es por sus esfuerzos conservacionistas y las controversias anejas, aunque el guerrero parece ahora cansado del debate público, subido de tono, y lo compara a una partida de ajedrez que ha acabado por aburrirle. "Le parece a uno que ha acabado con un disparate para siempre, y rebrota de nuevo", dice. "Cansa un poco, porque ya no le interesa a nadie".

A la edad de 68, Ehrlich sigue tieso como un palo, con su metro noventa de estatura. La voz profunda y sonora que tan bien daba en los platós de la televisión sigue todavía retumbando de su esbelta figura. Aquí, en su lugar de trabajo estival, el Laboratorio Biológico de las Montañas Rocosas en Gothic (Colorado), en el corazón de la sierra, a unos 200 kilómetros al sur de Denver, se ha dejado una barba que le da el aire de uno de esos mineros que otrora trabajaron en la zona durante la fiebre del oro. Sus grandes manos agarran vigorosamente el volante del jeep, que trepa por las roderas de la empinada cuesta embarrada hacia el atestado refugio de cuatro habitaciones que ha compartido con Anne, su mujer, durante los 40 últimos veranos.

A pesar de todo, la edad hace mella en Ehrlich, y eso no le agrada. "Ya no les gano a los alumnos de doctorado en la ascensión a la cumbre. Me tienen que esperar. Eso me deja apesadumbrado", dice con una mueca. Su única concesión a la edad cuando caminamos por la colina de su cabaña son dos bastones de monte para prevenir los resbalones. Sus chascarrillos y retruécanos, que no dejan títere con cabeza, salpican la conversación sobre los asuntos locales y del entorno. Con juegos de palabras, lanza sus puyas contra la Western Fuels Association, contra el Instituto Cato —su antagonista de siempre— y contra George W. Bush, al que despacha como "...ése que ocupa no sé qué cargo de nuestro país".

Su último trabajo refleja un cambio de interés: de la protesta contra el daño que la humanidad inflige al medio pasa a examinar el porqué. En *Human Natures: Genes, Cultures & the Human Prospect*, Ehrlich retorna a su formación académica de biólogo evolutivo para hostigar "el determinismo hereditario extremo", de cuya promulgación acusa a psicólogos evolutivos y a ensayistas. Nuestra evolución cultural tiene un protagonismo mucho mayor que nuestros genes a la hora de determinar el comportamiento, escribe Ehrlich, y debemos dirigir conscientemente ese proceso evolutivo en nuestro beneficio. "Pretendo comprender cómo podemos cambiar la evolución cultural humana para enfrentarnos con nuestros problemas ambientales", explica.

En el libro, Ehrlich alude a su temor a la muerte. Repantingados en un sofá de vuelta a la cabaña tras nuestra caminata pasada por agua, confiesa que no es tanto el miedo a morir cuanto la pena de dejar atrás a sus amigos. ¿La trascendencia? Confiesa que no va a renunciar al ateísmo en el que milita desde los seis años. Paul Ehrlich va a seguir en sus trece hasta el final.

Ciencia y sociedad

Evolución

Origen del vuelo

El origen de las aves constituye uno de los temas más sobresalientes de la evolución de los vertebrados, ya que involucra la transición desde animales adaptados a una vida terrestre hasta formas capaces de vencer la atracción gravitatoria gracias a potentes movimientos de sus brazos emplumados.

La capacidad del vuelo de las aves radica en el enérgico y amplio movimiento hacia arriba y abajo de las alas, un modo de vuelo que contrasta con el planeo pasivo de otros vertebrados voladores (por ejemplo, las ardillas voladoras). ¿Cómo surgió el vuelo de las aves? ¿Qué conjunto de transformaciones anatómicas y funcionales evolucionaron en los vertebrados que las precedieron? En última instancia, ¿quiénes son los antepasados de las aves?

La mayoría de los paleontólogos están convencidos de que las aves son descendientes directos de dinosaurios bípedos y carnívoros, cuyos miembros anteriores (originalmente adaptados para la captura y manipulación del alimento) se transformaron en alas. Además, se identifica a los dromaeosáuridos (grupo de ágiles depredadores que incluye a *Velociraptor* y *Deinonychus*) como los dinosaurios más cercanamente emparentados con las aves. Esta conclusión surge de las notables semejanzas anatómicas que los dromaeosáuridos comparten con el ave más antigua conocida, *Archaeopteryx lithographica*, del Jurásico de Alemania.

Sin embargo, desde que *Deinonychus* fuera descrito unos 25 años atrás por John Ostrom, del Museo Peabody, y su morfología fuera interpretada como muy semejante a la de *Archaeopteryx*, ningún otro dinosaurio había sido descubierto hasta la fecha que estrechara el hiato morfológico entre aquellas especies. Una exploración paleontológica que efectuáramos en 1996 a la Patagonia argentina, dio como resultado el hallazgo de un nuevo dinosaurio que llena parcialmente este hueco filogenético.



1. Reconstrucción del dinosaurio Unenlagia comahuensis. *Recientes hallazgos de dinosaurios emplumados en China refuerzan la hipótesis según la cual las plumas evolucionaron antes que la aparición de las aves y el vuelo. Sugestivamente, la capacidad de repliegue de los brazos contra el cuerpo presente en* Unenlagia *se asocia en las aves actuales a la posesión y protección de las plumas. En suma, no sería extraño que* Unenlagia *también las haya tenido. Ilustración de Jorge González*

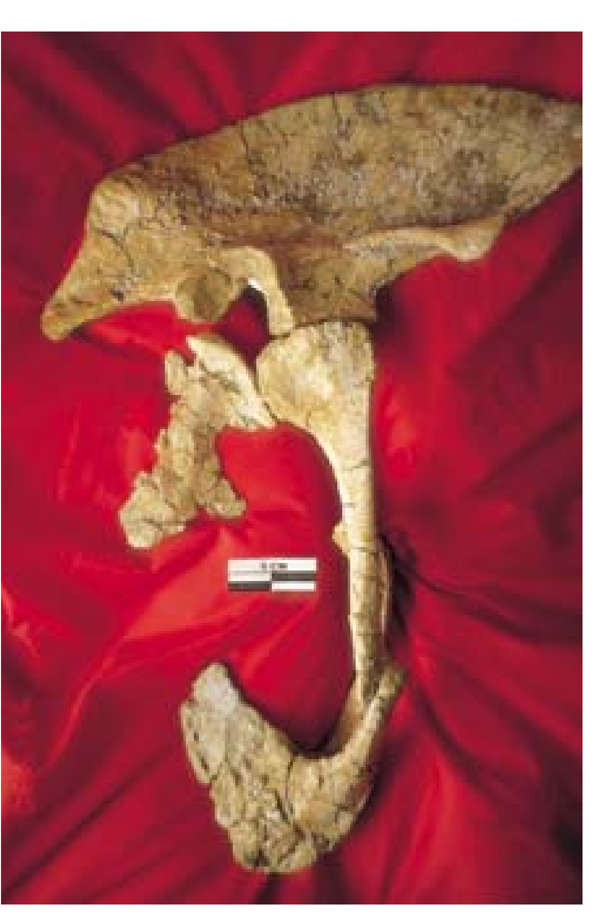
El descubrimiento consiste en parte del esqueleto de un grácil dinosaurio del tamaño de un avestruz, sepultado por las arenas finas transportadas por un curso de agua en el período Cretácico, 90 millones de años atrás. Lo bautizamos *Unenlagia comahuensis*, que en idioma indígena mapuche significa "mitad ave del norte de la Patagonia". Creemos que *Unenlagia* era un dinosaurio de hábitos depredadores; sus miembros posteriores, largos y esbeltos, sugieren que sus desplazamientos eran rápidos (*véase la figura 1*). Lo que más llama la atención de *Unenlagia* es que cada uno de sus huesos exhibe un "mosaico" o mezcla de rasgos anatómicos intermedios entre los dromaeosáuridos y las aves. Tal es el caso del isquión, de aspecto triangular como en *Deinonychus*, pero provisto de una proyección dorsal sólo documentada en *Archaeopteryx* y otras aves primitivas (*véase la figura 2*).

Sin embargo, están en la escápula, uno de los huesos del hombro, los datos más notables de *Unenlagia*: tal como ocurre en las aves la articulación humeral de la escápula se orienta lateralmente, en contraste con la mayoría de los dinosaurios, en los cuales dicha cavidad se orienta hacia atrás y abajo.

Esta orientación novedosa de la articulación del hombro implicó que los brazos de *Unenlagia* no pendieran debajo del cuerpo como en los restantes dinosaurios, sino que se plegaran contra el cuerpo a la manera de las aves actuales.

Pero la consecuencia más importante de esta nueva orientación articular fue la de ampliar el rango de elevación de los brazos, que podían así adquirir una posición casi vertical por encima de la espalda. Esta última cualidad también la presentan las aves y constituye una adaptación clave para el vuelo batido.

La anatomía de *Unenlagia* y sus relaciones de parentesco nos inducen a pensar que este dinosaurio no sólo era incapaz de volar, sino que sus ancestros tampoco fueron voladores.



2. Pelvis de Unenlagia *vista de lado. Cada uno de los huesos de la cadera de este animal muestra rasgos intermedios entre los del dromaeosáurido* Velociraptor *y los del ave primitiva* Archaeopteryx. *Las profundas transformaciones anatómicas de la cadera documentadas en la transición dinosaurios-aves probablemente se relacionen con una mayor capacidad de salto y absorción de fuerzas durante el aterrizaje*

Pese a ello, *Unenlagia* ya había adquirido novedosos movimientos casi avianos de los miembros anteriores. La mayor capacidad de elevación del brazo y el consecuente incremento en la amplitud del arco de movimientos de elevación y descenso constituye, a nuestro juicio, un prerrequisito para el enérgico vuelo aleteado. Tales transformaciones habrían permitido efectuar el empuje necesario para que los dinosaurios alados (las aves) se elevaran del suelo, capacidad que se obtuvo con el alargamiento de los brazos y de las plumas.

Las aves que despegan del suelo después de un corto correteo (gansos, por ejemplo) pueden constituir una valiosa fuente de información para interpretar la función de las protoalas y el surgimiento del vuelo aleteado. Los gansos jóvenes despliegan sus alas hacia fuera para mantener el equilibrio corporal al incrementar la velocidad de paso. En la medida en que las plumas del ala se desarrollan, estas aves utilizan sus alas como propulsores aerodinámicos que incrementan la velocidad de desplazamiento por medio de aleteos vigorosos. Cuando la velocidad suplida por las alas supera a la celeridad de los miembros traseros, se produce el despegue del suelo. Las protoalas de *Unenlagia* pudieron haber funcionado de una manera semejante a la de los gansos jóvenes.

La conclusión que se obtiene de este significativo hallazgo paleontológico es que no existió una fase de vuelo planeado o "pasivo" previa a la adquisición del vuelo batido. Al contrario, las aves y su capacidad de despegar del suelo por medio de un intenso aleteo es interpretada como una continuación del enérgico movimiento de los brazos de dinosaurios no-voladores para equilibrar su cuerpo durante la carrera en tierra.

FERNANDO E. NOVAS
AGUSTÍN SCANFERLA
Laboratorio de Anatomía Comparada y Evolución de los Vertebrados. Museo Argentino de Ciencias Naturales

El *p*H

Devaneos filológicos

Se escribe *p*H, con *p* minúscula y H mayúscula. Pero aunque lo repito mil veces en mis cursos universitarios, los estudiantes en sus trabajos lo escriben de diversas maneras: *PH*, *Ph*, *ph*... Se originan así equívocos, por ejemplo con otro *Ph* que se emplea también en química para indicar el grupo fenílico. Si se pregunta por el significado de *p*H, entre las pocas personas que se atrevan a dar una respuesta no faltará la que, engañada por esa *p*, diga que significa "presión del hidrógeno".

En realidad, la complicada historia de este símbolo proporciona muchas atenuantes a las distintas formas de escribirlo. Bernardino Fantini y Nicoletta Nicolini comentaban, hace 11 años, que primero se escribió p_{H+}, con explícita referencia a los iones hidrógeno (H+). De hecho, un líquido acuoso es tanto más ácido cuanto más concentrados están en él esos iones. Ningún hidrógeno puro y simple —como tal sería gaseoso y sólo entonces se podría hablar de presión— sino iones en solución.

Quien inventó el concepto de *p*H fue el danés Søren Peter Lauritz Sørensen (1868-1939), que lo propuso en un artículo de 1909 escrito en francés. Ocho años antes, al encargarse de dirigir los laboratorios químicos de la fábrica de cervezas Carlsberg, había orientado sus intereses científicos hacia la bioquímica. Fue pues la cerveza lo que le llevó a estudiar los efectos de la acidez en el funcionamiento de las enzimas de la fermentación, y, con ello, a sentir la necesidad de una medida clara y bien definida de la acidez misma.

Sørensen publicó enseguida su trabajo también en versión alemana, pero en ella el símbolo perdió la + quedándose en sólo p_H. Mas esta simplificación no les bastaba a los tipógrafos, que pronto hubieron de componer los escritos en que muchísimos científicos de diversas partes del mundo insertaban el nuevo concepto.

En 1920 —según refieren Fantini y Nicolini— el estadounidense William Mansfield Clark, en homenaje al ilustre danés, propuso que se cambiara el símbolo, prefiriendo el de ºS (grado Sørensen); mas, para entonces, el p_H había alcanzado ya enorme difusión. Además, el influyente bioquímico alemán Leonor Michaelis propugnó su uso. De modo que no hubo cambios sustanciales, pero los tipógrafos —esta vez americanos— lograron otra victoria consagrando definitivamente la escritura en línea: *p*H.

Queda por explicar el origen de esa *p*, y para hacerlo he de admitir ante todo que, hasta hace pocos meses, lo mismo yo que otras muchas personas teníamos ideas equivocadas. Simplificando, cabe definir el *p*H como el exponente que hay que aplicar, con el menos por delante, al número 10, para tener la concentración de los iones hidrógeno, de la que es, por tanto, el logaritmo decimal cambiado de signo. A su debido tiempo se me había enseñado (y también se lo he dicho yo siempre así a los estudiantes) que *p* era un operador matemático correspondiente a $-log_{10}$. Pero este uso es muy propio de nosotros los químicos, que efectivamente lo extendemos a la



El concepto de pH se originó a comienzos del siglo XX en una fábrica de cerveza parecida a ésta

concentración de un ion cualquiera, mientras que he descubierto que a los matemáticos ese presunto operador les es totalmente desconocido.

Algunos manuales hacen derivar la *p* de la inicial de las palabras que, en los idiomas de los trabajos de Sørensen del año 1909, indican la potencia, en el sentido matemático del término. Pero que las cosas no son así lo demuestra un artículo publicado en el 2000 por el bioquímico danés Jens Nørby, cuyo padre, entre 1931 y 1934, preparó su tesis doctoral precisamente en los laboratorios Carlsberg bajo la guía de Sørensen y dispuso de una copia del trabajo que éste había escrito en francés en 1909. Nørby hijo, estudiando a fondo esta copia heredada por él, se ha dado cuenta de que el trabajo en cuestión es bastante más citado que leído atentamente.

La cosa es, en realidad, muy simple: en las ecuaciones de las que saca el concepto de *p*H, Sørensen utiliza dos letras, *p* y *q*, sin ninguna intención especial. La *p* figura de nuevo en el símbolo final, pero sin implicaciones semánticas. Lo curioso es que los químicos no tardaron mucho en atribuirle, en cambio, alguna significación, empezando por Clark, que en 1922 la relacionó con el potencial electroquímico, del cual había partido Sørensen para una definición operativa del nuevo concepto. Seis años después cambió Clark de idea y lanzó la antedicha hipótesis de que debía de tratarse de la letra inicial de *Potenz* ("potencia matemática" en alemán).

El fantasmagórico operador *p* lo ha encontrado Nørby definido en un libro universitario danés de química orgánica editado en 1966; pero la hipótesis más fantasiosa es la de un texto escolar alemán de 1988: *p* y H serían las iniciales de "*p*ondus *h*ydrogenii". ¡Nada menos que toda la solemnidad del latín para referirse al peso (o quizá directamente —¡qué disparate!— a la presión del hidrógeno!) He aquí un *corpus* hermenéutico a cargo de una serie de filólogos improvisados a cuyas espaldas es probable que el espíritu del buen Sørensen se carcajee muy divertido.

GIANNI FOCHI

Universo lejano

Galaxias ricas en gas molecular

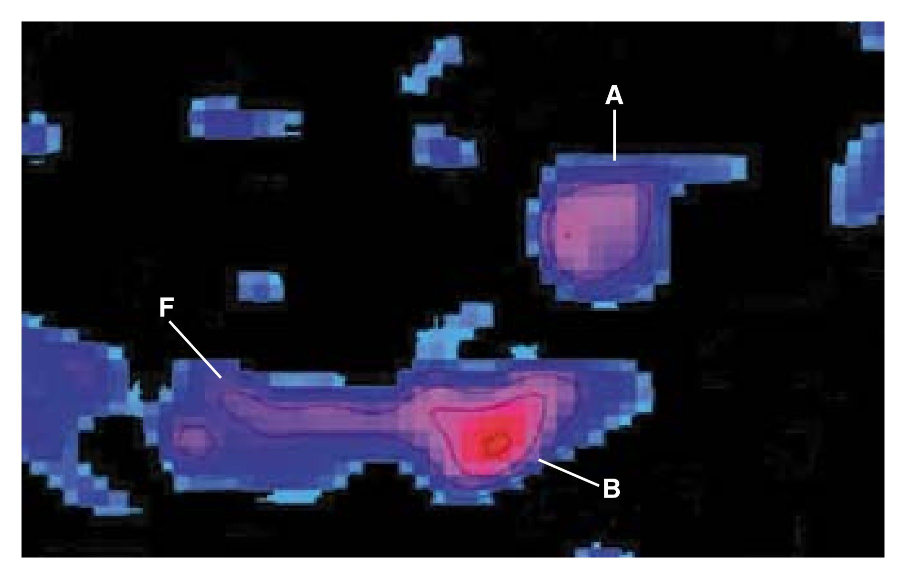
Desde hace unos años se está estudiando el universo lejano con un detalle sin precedentes, en lo que constituye nuestros primeros pasos hacia la comprensión del nacimiento y evolución de las galaxias tras la gran explosión ("Big Bang"). La medición de la cantidad de gas molecular, del que nacen las estrellas, en galaxias del universo joven ha abierto la puerta al estudio de la historia de la formación de estrellas a lo largo de la vida del universo.

La primera detección de la presencia de gas molecular se produjo en 1992. Ahora se ha descubierto ya en una decena de galaxias. Sin embargo, la falta de resolución de los radiotelescopios ha impedido conocer la distribución exacta del gas molecular en tales galaxias, un dato esencial para saber si el nacimiento de estrellas se concentra en su núcleo o abarca toda la galaxia.

Esta dificultad ha sido superada en nuestro estudio reciente del cuásar QSO 0957+561, en el que describimos por primera vez la galaxia anfitriona de dicho cuásar, situado a nueve mil millones de años-luz. Conocido coloquialmente como el *cuásar gemelo*, pues su imagen muestra dos puntos brillantes de magnitud aparente 16,7 (veintiún millones de veces más débil que la estrella Sirio), debe su apariencia óptica al efecto de lente gravitatoria de una galaxia interpuesta entre el cuásar y el observador. La lente produce un efecto de amplificación de la radiación, que facilita la detección del cuásar y del material que lo rodea.

El interés de nuestra investigación radica en el método empleado y en el resultado obtenido. Hemos utilizado el efecto de *lupa* producido por una lente gravitatoria, para conocer detalles morfológicos de la galaxia que hospeda el lejano cuásar, y hemos recurrido al análisis espectroscópico de la radiación radio, para obtener información cinemática. Habiendo escogido el cuásar adecuado para aplicar tal método, hemos logrado medir la extensión en que se distribuye el gas molecular en la galaxia anfitriona.

La medición nos ha brindado una sorpresa adicional, al detectar emisión de gas molecular moviéndose a



1. Intensidad de la emisión de monóxido de carbono, el trazador de gas molecular, en la dirección del cuásar QSO 0957+561. Los picos de emisión etiquetados A y B se encuentran en la posición de las imágenes del cuásar producidas por la lente gravitatoria. La región F no aparece en las imágenes ópticas y demuestra que el gas molecular se distribuye en una región extensa alrededor del cuásar, de varias decenas de miles de años-luz de diámetro

gran velocidad (440 km/s) respecto del movimiento de la galaxia, emisión que hemos interpretado como perteneciente a una hasta ahora desconocida galaxia compañera en posible colisión con ella.

Durante mucho tiempo se ha supuesto que la actividad de los cuásares lejanos acontece en jóvenes galaxias del universo primitivo, época en que las grandes cantidades de gas molecular disponible favorecen el nacimiento de muchas estrellas y pueden alimentar la fuente que produce el cuásar. Sin embargo, las observaciones recientes de cuásares cercanos abonan otra posibilidad: los cuásares podrían originarse en galaxias desarrolladas que experimentan una fuerte interacción con una galaxia compañera o que, incluso, la capturan fusionándose con ella.

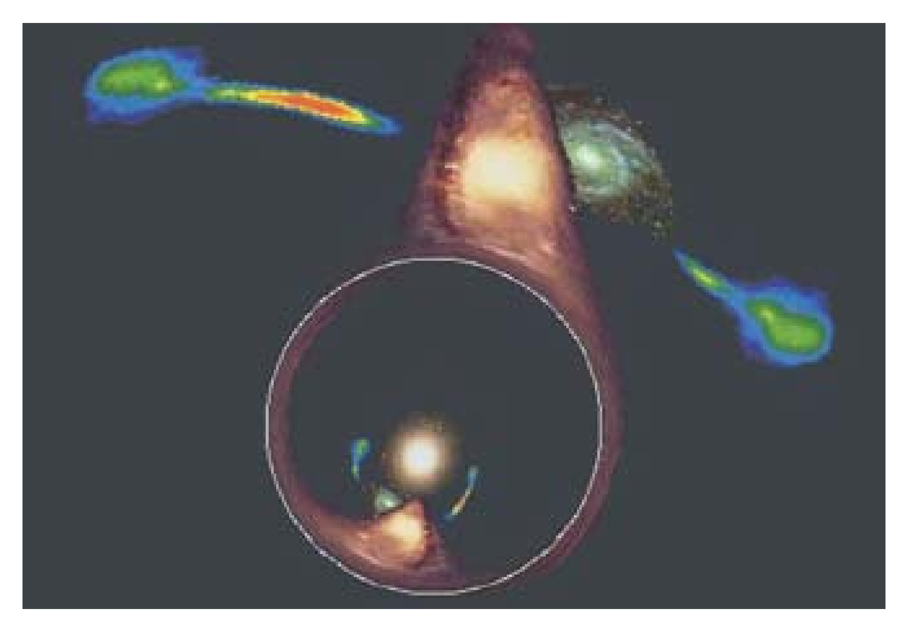
Uno de los efectos de tal interacción entre galaxias es la caída de grandes cantidades de gas molecular hacia el centro de la galaxia absorbente, lo que permite *alimentar* la fuente del cuásar. El cuásar lejano QSO 0957+561 se ajusta también a esta explicación, pues se ha descubierto que la galaxia anfitriona es rica en gas y tiene una compañera.

Nuestras mediciones muestran que la espectroscopía de rayas espectrales de moléculas realizada con alta resolución (angular y en velocidad) permite revelar los efectos de una lente gravitatoria sobre las diferentes partes de una galaxia, aun cuando ésta se halle demasiado remota y ningún telescopio pueda resolver sus detalles de otra forma.

Los efectos selectivos de la lente sobre distintas partes de la galaxia y, por tanto, sobre regiones con distinto movimiento relativo, permite conocer la distribución del gas molecular, su movimiento e, incluso, si hay más de una galaxia rica en gas en la misma dirección. Estas observaciones se han realizado con el más potente de los interferómetros milimétricos actuales, el de IRAM situado en Plateau de Bure (Francia).

Ahora bien, ese tipo de observaciones sólo es posible de momento con cuásares luminosos en los que la acción de una lente gravitatoria da imágenes amplificadas y separadas por varios segundos de arco. En el futuro dispondremos de interferómetros milimétricos mucho más potentes, como el Atacama Large Millimeter Array (ALMA). Este instrumento, complementado con grandes telescopios ópticos e infrarrojos, como el telescopio español Grantecan y el telescopio espacial FIRST, permitirá tener una visión cabal del nacimiento de las galaxias en el universo primitivo y del origen de la actividad de los cuásares.

PERE PLANESAS
Y JESÚS MARTÍN-PINTADO
Observatorio Astronómico Nacional (IGN)
LUIS COLINA
Instituto de Física de Cantabria (UCan-CSIC)
ROBERTO NERI
Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM)



2. Modelo esquemático en que se muestran los efectos de una lente gravitatoria (una galaxia elíptica) sobre la imagen de la galaxia espiral que hospeda el cuásar. Tal galaxia tiene dos extensos chorros de plasma que se detectan en radiocontinuo y una posible galaxia compañera. La imagen superior corresponde a A en la figura 1, la inferior a B y la extensión de ésta hacia la izquierda a F

Mejora industrial

Rectificación reactiva

La combinación de un reactor químico y una columna de destilación es una alternativa de creciente importancia frente a los procesos clásicos, diseñados para operar secuencialmente y que involucran grandes corrientes de recirculación. La *rectificación reactiva* presenta una serie de ventajas como son minimizar las necesidades de proceso aguas abajo, aumentar la conversión de las reacciones reversibles mediante la retirada continua de productos, utilizar el calor de reacción para la evaporación de la fase líquida y eliminar las restricciones impuestas por las mezclas azeotrópicas.

La aplicación industrial no se limita a la producción de compuestos presentes en la gasolina, como el metil *terc*-butil éter (MTBE) o el *terc*-amil metil éter (TAME), sino que alcanza las esterificaciones (acetato de butilo) e hidrataciones (alcohol *terc*-amílico).

La utilidad de la rectificación reactiva depende de una serie de factores que se pueden evaluar *a priori*, tales como la expresión cinética, la entalpía de reacción, el tipo de reacciones secundarias y las dificultades de separación de los compuestos inertes y productos. Adoptando modelos simplificados, se puede obtener una primera estimación de su utilidad mediante el simple cálculo de módulos adimensionales: el número de Damkohler, que indica la extensión de la reacción, y el número de Hatta, que señala la etapa controladora del sistema.

El análisis riguroso de este tipo de sistemas es complejo, puesto que el equilibrio químico y el equilibrio líquido vapor se producen simultáneamente. Para resolver este tipo de problemas, y al igual que en otras áreas de la ingeniería química (integración energética, mecánica de fluidos), se han desarrollado herramientas gráficas de análisis. En particular se emplea una técnica propia de la síntesis de secuencias de separación: los *mapas de residuos*. Dicha técnica permite, de forma visual, detectar la presencia de azeótropos, la existencia de fronteras de destilación y evaluar la obtención de diferentes productos únicamente en función de la composición del alimento. Ampliando la aplicación de los mapas de residuos al caso reactivo, se puede discernir si la reacción da lugar a nuevas restricciones (azeótropos reactivos) que limiten la posibilidad para cruzar las *fronteras de destilación* presentes en el sistema no-reactivo.

En los últimos años es práctica común aprovechar las facilidades que ofrece la simulación de procesos, tanto en estado estacionario como de análisis dinámico, pese a que frecuentemente se olvida que los factores clave en su manejo son la selección de un método de estimación de las propiedades físicas adecuado y discernir entre la ingente cantidad de información que suministra. Conviene poner especial énfasis en que, pese a que las propiedades físicas se pueden calcular a partir de un modelo de contribución de grupos, comprobar la exactitud de su predicción es la única forma de obtener resultados realistas.

La figura adjunta muestra un protocolo iterativo para diseñar rigurosamente los equipos de rectificación reactiva. Dos factores con gran influencia en el diseño final son el cálculo del volumen de retención líquido (depende de las condiciones hidrodinámicas de funcionamiento y tiene un importante efecto debido a las reacciones competitivas y consecutivas) y la selección del tipo de catalizador (preferentemente heterogéneo, ya que facilita su posterior separación, y dispuesto en el interior de rellenos ordenados para mejorar tanto el contacto entre fases como las propiedades mecánicas).

Las dificultades en el control de las unidades de rectificación reactiva han constituido durante largo tiempo un freno a su aplicación industrial. Actualmente, y debido a la aplicación de estrategias de control avanzado de procesos, se ha superado dicha restricción. El sistema de control debe mantener, además de las especificaciones de los productos (pureza mínima y máximo nivel de impurezas), objetivos secundarios (razón molar entre reactantes próxima a la estequiométrica, maximizar la vida del catalizador). *A priori* no existe una estrategia mejor que otra, aunque se puede decir que el aspecto energético (bien sea el calor suministrado por la caldera o bien la energía procedente de la reacción) es un factor con una influencia decisiva. El análisis del comportamiento dinámico frente a perturbaciones (caudal y composición del alimento, razón de reflujo o valor consigna del controlador) permite conocer la sensibilidad de la estrategia de control, así como la detección de múltiples estados estacionarios, aspecto relativamente frecuente en este tipo de sistemas.

La intensificación de la separación y el uso eficiente de las materias primas y de la energía son características inherentes de la rectificación reac-

ESPECIFICACIONES DE DISEÑO
EXCESO DE REACTANTES
PRESION DE OPERACION
SIMULACION PRELIMINAR
RAZON DE REFLUJO
PERDIDA DE CARGA
NUMERO DE ETAPAS TEORICAS
EFICACIA
CALOR EN LA CALDERA Y CONDENSADOR
DIAMETRO DE LA COLUMNA
OPTIMACION

Procedimiento iterativo de diseño para equipos de rectificación reactiva

tiva. Las principales ventajas son el considerable ahorro de costes, tanto de capital como energéticos, la eliminación de las limitaciones del equilibrio químico y la simplificación del sistema de separación.

LAUREANO JIMÉNEZ ESTELLER
Departamento de Ingeniería Química,
Universidad Rovira i Virgili,
Tarragona.

Transporte de protones

a través de proteínas

A partir del desarrollo de la teoría quimiosmótica de Peter Mitchell en los años sesenta, quedó claro que el transporte selectivo de protones a través de las membranas celulares era indispensable para el uso eficiente de la energía en los seres vivos. La energía luminosa, en autótrofos, y la metabólica, en heterótrofos, se emplean para generar un gradiente protónico transmembranal, que a su vez se aprovecha para la síntesis de combustible metabólico (generalmente ATP).

Aunque estos conceptos se hallaban bien asentados, se desconocían, hasta hace poco, los mecanismos moleculares subyacentes. ¿Cómo logran los protones recorrer grandes distancias a través de proteínas de membrana? ¿De qué modo impulsan ese flujo protónico el transporte de electrones o la energía luminosa? Corresponde a la bioenergética dar respuesta a estas preguntas.

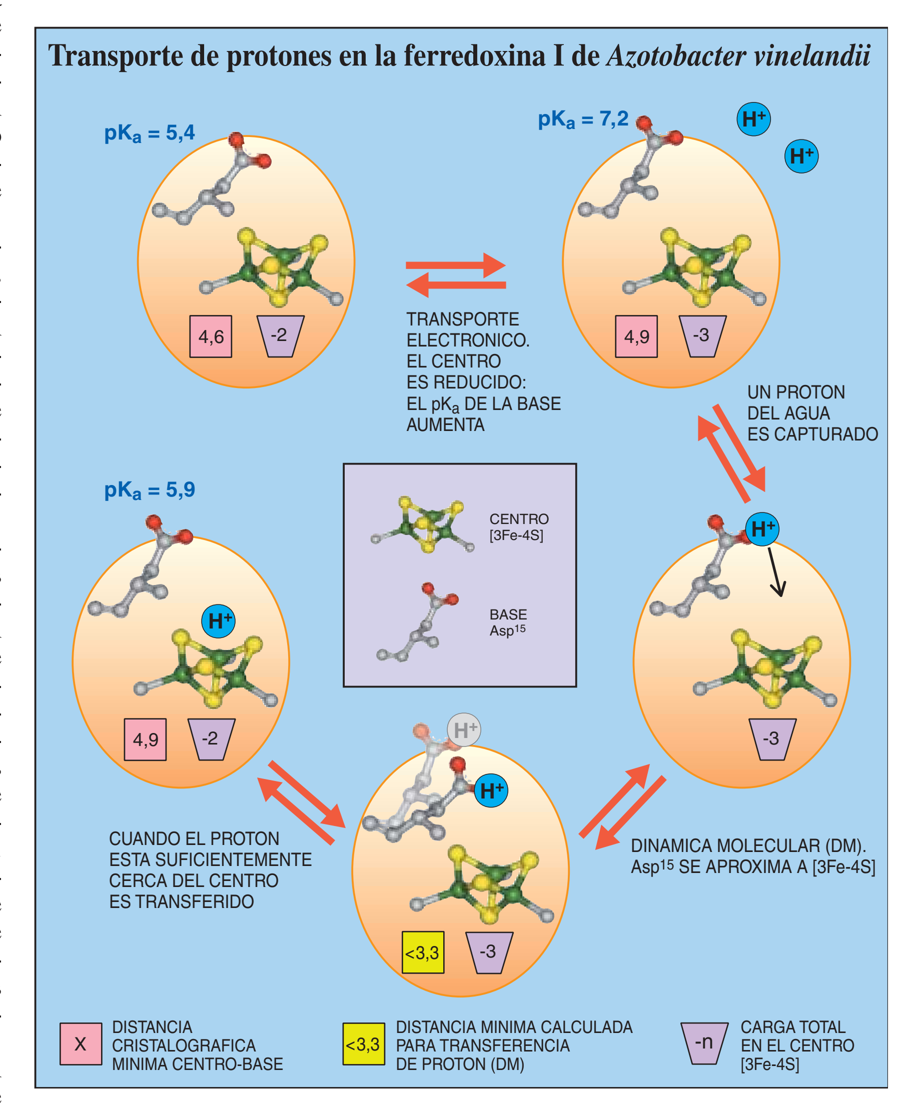
La investigación reciente sobre estructuras cristalográficas de bombas protónicas de membrana, las proteínas responsables de la translocación de protones, revela la existencia de "canales protónicos" de entrada y salida: son invaginaciones en la proteína que dan cabida a cadenas de moléculas de agua (y a veces residuos protonables) que permiten el paso de protones. Habiendo agua, el transporte protónico es sumamente rápido. Se ha propuesto que no es necesario el traslado directo del protón de un extremo al otro del canal, ya que la carga puede propagarse por simple alternancia de enlaces covalentes y puentes de hidrógeno entre moléculas vecinas.

Además de canales protónicos, en las proteínas de membrana tiene que haber regiones donde los protones deban cruzar barreras hidrofóbicas. Estas barreras son indispensables para poder controlar el flujo protónico. Un canal que conectase libremente ambos lados de una membrana no permitiría la acumulación selectiva de iones, haciendo imposible la transducción energética. No ocurre eso, sino que las barreras hidrofóbicas actúan como interruptores y determinan la unidireccionalidad del transporte de protones.

Del paso de los protones a través de las barreras se encargan los grupos protonables de la proteína, es decir, cofactores o residuos de aminoácidos, siempre y cuando cumplan una condición: la afinidad de tales residuos por los protones (pKa), su orientación o ambas se modulen en respuesta a un estímulo.

El pKa de los grupos transportadores de protones debe ser variable, pues se trata de un transporte neto en razón del cual el protón capturado a un lado de la membrana (pKa alto) ha de soltarse luego al otro lado de la misma (pKa bajo). Ese cambio de pKa puede venir causado por la modificación del estado de oxidación de un grupo cercano al residuo transportador o por un cambio conformacional inducido por absorción de energía. No es fácil establecer en el laboratorio los pormenores del proceso, dada la acostumbrada complejidad de las proteínas involucradas. Pese a ello, se han registrado avances importantes.

La bacteriorrodopsina constituye, a buen seguro, la bomba protónica mejor estudiada. En ese sistema, el episodio principal que controla el transporte de protones estriba en la fotoisomerización de una molécula de retinal que reside en el centro de la proteína. El retinal conecta canales que entran en el citoplasma y salen



Mecanismo de transporte de protones hacia el interior de una proteína. La acidez del grupo transportador de protones responde al estado de oxidación del aceptor

hacia el líquido extracelular. La fotoisomerización provoca cambios conformacionales y de afinidad de protones de varios residuos del sitio activo; se produce con un ello un transporte de protones desde el citoplasma hacia el líquido extracelular.

Los centros de reacción bacterianos y la anhidrasa carbónica son otros sistemas estudiados. Con particular intensidad lo ha sido la citocromo c oxidasa, una enzima. En este sistema, la oxidación de cuatro moléculas de citocromo c se acopla a la reducción de oxígeno a agua, con la creación simultánea de un gradiente protónico. La proteína dispone, por lo menos, de dos canales de entrada de protones y uno de salida, además de varios centros metálicos que controlan el flujo energético.

Nosotros hemos abordado un sistema modelo que permite entender, en su nivel atómico, los mecanismos del transporte de un protón desde el solvente hasta el interior hidrofóbico de una proteína. Se trata de la ferredoxina I de la bacteria *Azotobacter vinelandii*. En este sistema, la reducción de un centro sulfoférrico [3Fe-4S], que se encuentra sumergido 8 angstrom bajo la superficie de la proteína, fuerza la entrada de un protón hacía el centro, a través de un medio sin presencia de agua que lo auxilie.

Mediante una combinación de voltamperometría de proteína en monocapa, estudios de dinámica molecular, cristalografía de rayos X y mutagénesis, hemos llegado a la conclusión de que el grupo portador del protón es un aspartato (Asp^{15}), que está en la superficie de la proteína. El estudio revela que los pKa del aspartato (inicialmente donador de protón) y del centro [3Fe-4S] (aceptor de protón) están interconectados, y dependen del estado de oxidación de este último.

Así, cuando el centro se halla oxidado, el pKa del aspartato es muy bajo (5,4) y permite la captura de un protón. La reducción del centro ejerce un doble efecto: el aspartato cambia su conformación quedando más lejos del centro debido a la mayor repulsión electrostática y además su pKa aumenta hasta 7,2, lo que posibilita la captura de protones.

Una vez que el aspartato adquiere protones, cae la repulsión electrostática. Por procedimientos de dinámica molecular se observa que, gracias a la movilidad de esta cadena, llega un momento en que se produce una aproximación suficiente para que el protón se transfiera al centro. Secuencia de pasos que puede reandarse para expulsar al protón hacia el solvente.

Las proteínas modificadas por sustitución del aspartato con otro aminoácido realizan el transporte protónico a una velocidad 100 veces menor que la proteína nativa, aun cuando el sustituto sea el glutamato, que es un grupo capaz de adquirir protones aunque con una longitud alejada de las condiciones óptimas para la entrega del protón al centro sulfoférrico.

La simplicidad de este modelo plausible de transporte protónico le añade especial atractivo, pues revela los pormenores de la interconexión entre las diferentes partes que lo cons-

tituyen. En las complejas bombas protónicas de membrana ocurrirán, a buen seguro, procesos similares. La ciencia no tardará mucho en descifrarlos.

RAÚL CAMBA
Laboratorio de química inorgánica
Universidad de Oxford

Energía eléctrica

Convertidores de continua en continua

La electricidad, tras haber adquirido el monopolio de la energía consumida en la industria (aproximadamente un 95 % de la misma), constituye uno de los elementos distintivos de nuestra sociedad.

Corresponde a la electrónica de potencia transformar y procesar la energía eléctrica para su posterior aprovechamiento. Son múltiples tales aplicaciones: alimentaciones reguladas de alterna y continua, procesos electroquímicos, control de hornos, calentamiento por inducción y un largo etcétera.

Esta transformación se lleva a cabo mediante equipos electrónicos (convertidores) integrados por semiconductores de potencia que modifican el perfil de la tensión, corriente de entrada o ambas, y que están controlados por chips microelectrónicos. La aparición de nuevos semiconductores de potencia, capaces de manejar mayores potencias con mejor calidad, y de nuevos chips, que permiten llevar a la práctica técnicas refinadas de control, ha posibilitado la evolución de los equipos electrónicos hacia un menor tamaño, una drástica disminución del coste y una mayor calidad.

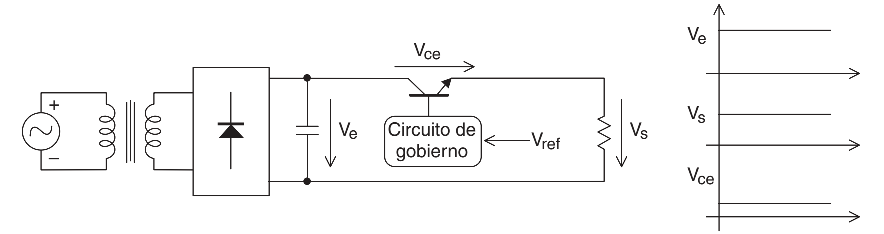
Los convertidores pueden ser de alterna en continua, alterna en alterna, continua en alterna y continua en continua.

Los convertidores de continua en continua, o convertidores DC/DC, transforman la tensión de continua no regulada en tensión de continua controlada. Los primeros convertidores DC/DC fueron las fuentes lineales con técnicas de regulación asimismo lineales. Les siguieron los convertidores accionados mediante la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM, de "Pulse Wide Modulation"), entre los cuales se encuentran las fuentes de alimentación conmutadas, que alimentan equipos electrónicos (televisores, ordenadores, etc.), y los troceadores de continua, empleados en accionamientos eléctricos.

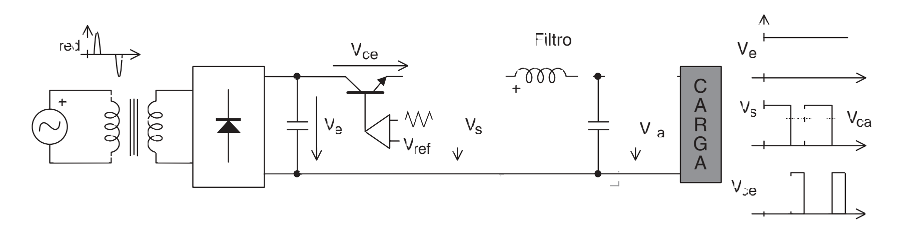
Los reguladores lineales son sistemas realimentados que no presentan problemas de rizado ni ruidos. Tienen el inconveniente de su bajo rendimiento. Estas fuentes sitúan, entre la entrada y la carga, un transistor controlado por un circuito que regula linealmente la tensión en bornes del transistor, obteniéndose así la tensión de salida deseada (*figura 1*). Dado que el transistor trabaja en la zona lineal, las pérdidas producidas son importantes y se requieren radiadores de gran tamaño. Por este motivo, tales fuentes se abandonaron muy pronto, reservadas hoy para potencias inferiores a 50 watt.

Mediante la técnica PWM se hace conmutar a los interruptores a frecuencia constante, aunque variando las proporciones de tiempo de encendido y apagado en cada período de conmutación. Se produce a la salida una tensión pulsante cuyo valor medio queda controlado por la anchura de los pulsos (*figura 2*). La intersección de una onda triangular con una señal de referencia determina el momento de las conmutaciones; el valor medio de la tensión de salida es proporcional a dicha señal de referencia.

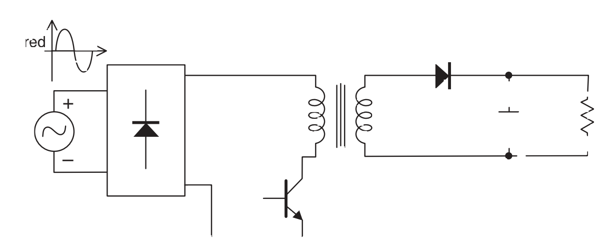
La aparición de técnicas de conversión de la energía mediante fuen-



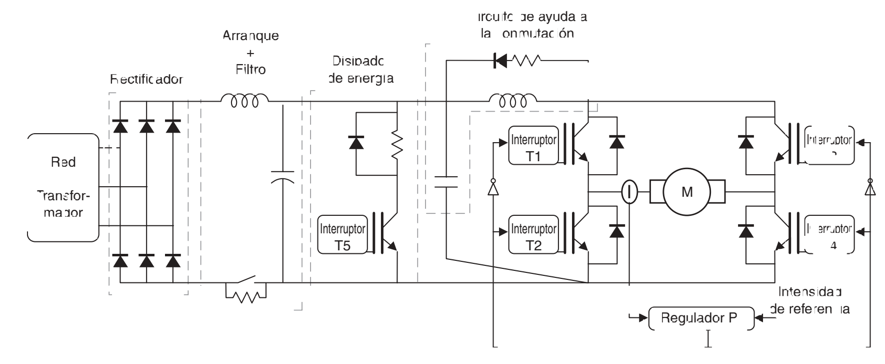
1. Regulador lineal y formas de onda asociadas



2. Fuente conmutada por PWM y formas de onda asociadas



3. Convertidor de retorno ("flyback")



4. Esquema de convertidor DC/DC de cuatro cuadrantes para controlar el par de una máquina de corriente continua de 8 kilowatt

tes conmutadas aumentó el rendimiento, pero incrementó también la distorsión armónica en la carga. Para reducirla se recurrió a los filtros.

Por ser alterna la red, las fuentes conmutadas necesitan una etapa rectificadora en su configuración. Durante un tiempo, se utilizó un transformador reductor conectado a red con un puente de diodos monófasico, que, sin embargo, ocasionaba fuertes perturbaciones en ésta.

Cuando se generalizó el uso de los sistemas de potencia conmutados, la exigencia de disminuir la distorsión armónica en red obligó a limitar el contenido de armónicos introducidos en red (norma EN 61000-3-2). Hubo que modificar el diseño de las fuentes. Ahora se sitúa en primer lugar el puente de diodos, luego una etapa correctora del factor de potencia y, por fin, el transformador, obteniéndose de esta manera un convertidor con absorción de corriente senoidal de la red. La situación del transformador permite disponer de varios secundarios y con ello de varias tensiones de salida distintas; además, al trabajar a alta frecuencia su tamaño es menor.

Las principales fuentes conmutadas por PWM son la reductora (*buck*), la elevadora (*boost*) y la de retorno (*flyback*). De las tres, la última, que incluye un aislamiento galvánico en su estructura (*figura 3*), es la más utilizada.

Las fuentes conmutadas por PWM no pueden, sin embargo, evitar fuertes pérdidas al tener que conmutar los interruptores a plena carga. Pérdidas que aumentan con la frecuencia de conmutación; de ahí que la conmutación quede limitada por la topología diseñada y el tipo de interruptor usado.

En las aplicaciones de alta potencia se utilizan principalmente IGBT, interruptores que trabajan a frecuencias superiores a varios kilohertz, mientras que en las de baja potencia y baja tensión se emplean transistores MOSFET, que permiten trabajar a frecuencias superiores a los 100 kHz.

El interés de la alta frecuencia radica en la disminución de transformadores y filtros. En el diseño de fuentes de alimentación usadas en ordenadores, telecomunicación e instrumentación, resulta fundamental la reducción del tamaño del convertidor para que sea compatible con los nuevos chips desarrollados en electrónica de control y procesamiento de información.



5. Equipo convertidor DC/DC de cuatro cuadrantes

Para reducir las pérdidas en la conmutación de los semiconductores, se han ideado nuevas topologías y estrategias de conmutación con las que se obtienen conmutaciones a corriente o tensión cero. Son las llamadas "fuentes conmutadas con conmutación suave" o "fuentes resonantes", que incorporan en el esquema de funcionamiento del convertidor circuitos resonantes LC que ocasionan formas de onda senoidales de corriente y tensión.

La conmutación sin pérdidas se obtiene al conmutar durante los pasos por cero de estas ondas. Ello permite aumentar la frecuencia de conmutación (por encima del megahertz), obteniéndose una compacta fuente de alimentación. Además, al trabajar con ondas senoidales en vez de cuadradas, decae la emisión de ondas electromagnéticas. Sus principales inconvenientes son el aumento de las pérdidas de conducción y de la tensión que tienen que soportar los semiconductores debido a las formas senoidales de la tensión y corriente, así como el incremento de pérdidas en las inductancias y condensadores por la alta frecuencia. Estas fuentes hallan buena acogida en las aplicaciones donde importe la disminución del peso, como ocurre en telecomunicaciones e ingeniería aerospacial.

Los troceadores de continua, destinados a mover máquinas de corriente continua con precisión y rapidez, los encontramos en robótica, en máquinas herramientas y otros equipos de gran potencia que se alimentan de redes trifásicas. Pueden ser de un solo cuadrante, en los que tensión y corriente tienen una polaridad, y de cuatro cuadrantes (*figuras 4* y *5*), donde tensión y corriente poseen ambas polaridades.

Los armónicos producidos por el puente rectificador utilizado a la entrada del troceador, menos críticos que en el caso de las fuentes conmutadas, y en situaciones especiales se amortiguan con la inclusión de una inductancia.

El convertidor de cuatro cuadrantes, o de puente en H, cumple la función de trocear la tensión continua obtenida a partir del rectificador manteniendo en todo momento controlado el valor medio de la tensión troceada.

Para obtener la tensión continua de entrada que alimenta el convertidor se utiliza un transformador con un puente de diodos y un filtro. El convertidor DC/DC propiamente dicho consta de cuatro interruptores, formados cada uno por un IGBT y un diodo en antiparalelo; alimenta una máquina de corriente continua con una corriente regulada por un circuito de control.

Dado que el motor presenta una gran inductancia, no es necesario incluir un filtro en la salida del convertidor. Al no ser reversible el puente de diodos, se incluye un circuito para disipar la energía procedente de la máquina cuando ésta se comporta como generador (frenados rápidos). Un circuito de ayuda a la conmutación a la entrada del convertidor permite disminuir las pérdidas. El circuito de arranque garantiza una carga suave del condensador del filtro durante el arranque.

PABLO SANCHIS GÚRPIDE
Y LUIS MARROYO PALOMO
Departamento de Ingeniería
Eléctrica y Electrónica
Universidad Pública de Navarra,
Pamplona



De cerca

H. Van Damme, F. Duval y Y. Abdelhaye

La fractura de las rocas explicada a través de los geles

A la industria petrolera le interesan las fracturas. Para extraer mejor los combustibles fósiles alojados en las rocas, se inyecta en ellas agua a presión, con la intención de dilatar los intersticios creados por las fracturas, dilatación que facilitará la circulación del petróleo hacia las estaciones de bombeo.

¿Cómo se producen las fisuras de las rocas? La ruptura se inicia en el punto de inyección del líquido cuando la presión de éste supera el límite de ruptura de la roca. La fisura se forma en un plano vertical, porque, en él, la abertura de la fisura es menos perturbada por el peso de las capas superiores, que en otro plano volverían a cerrarla.

Una vez iniciada, la fisura continúa su propagación sin apenas consumo de energía, pues su apertura ocasiona una recuperación de energía. En efecto, el líquido que abre una fisura empieza deformando el material, realizando un trabajo mecánico; después, cuando se abre el fondo de la fisura, cesa la deformación en el punto inicialmente deformado, y es restituida la energía "elástica", que ahora deforma el material situado por delante.

Para preparar un modelo de este fenómeno hemos recurrido a la laponita, una arcilla sintética en suspensión acuosa. Esta suspensión forma un gel, que hará el papel de la roca. Al aplicarle al gel un esfuerzo moderado, reacciona elásticamente; al cesar la aplicación de fuerzas deformantes, recupera su forma inicial. Por otra parte, cuando las deformaciones son excesivas, el gel cede. Inyectamos en ese punto una resina epoxídica, que hace el papel del agua, y observamos que la forma de las fracturas varía en función de las viscosidades respectivas de la resina y del gel.

Cuando la resina, a la velocidad de inyección, es mucho más viscosa que el gel, forma una gota. Por el contrario, cuando la resina es poco viscosa, el gel experimenta fractura. A velocidad de inyección reducida (unos pocos milímetros por segundo), aparecen varios planos de fractura, cada uno de los cuales se divide, tras cierto recorrido, en varios planos de fracturas secundarias.

Los experimentos anteriores revelan tres fenómenos. El primero concierne al frente de invasión: estable en forma de gota que se hincha cuando el fluido más viscoso invade al otro (pensemos en la miel al caer en el agua); en el caso inverso se torna inestable, y el frente se vuelve irregular.

Por otra parte, aunque los geles de laponita sean mucho menos rígidos que los metales o las rocas, el fluido inyectado puede fracturarlos, porque, al igual que en cuerpos sólidos como las rocas, la energía elástica es restituida al abrirse y propagarse una fisura. Este tipo de propagación no era de esperar en el caso de los geles.

El tercer fenómeno, por último, es el más sorprendente: la gran inestabilidad de la fractura al aumentar su velocidad. Tanto en metales como en rocas, la teoría de la mecánica de medios continuos prevé un cambio de dirección de las restricciones en la extremidad de la fisura cuando la velocidad de la brecha ronda en torno a la mitad de la velocidad del sonido en el material. El sonido, en efecto, consiste en la propagación de variaciones de presión, y su velocidad es la velocidad máxima de propagación de las variaciones de presión en el material.

Ahora bien, una fisura que se abre está acompañada de variaciones de presión (compresiones y relajaciones consecuentes a la ruptura). Como estas variaciones no se pueden desplazar a velocidad mayor que la velocidad del sonido, y dado que el líquido es inyectado por la fuerza en el material, la fisura se bloquea, prosiguiendo entonces lateralmente, en direcciones a las que no se propagaría otra vez a la velocidad del sonido. Tal es la explicación de los planos de fractura inclinados con respecto al plano de fractura inicial, vertical. Estos planos de fracturas secundarias se pueden escindir en planos de tercer orden, y así sucesivamente. Se forma de este modo la estructura fragmentada que vemos en la fotografía.

La velocidad del sonido es muy alta en las rocas y en los metales (alrededor de 1000 metros por segundo), por lo que el fenómeno de desviación de las fisuras es raro. En un gel, sin embargo, la velocidad de las ondas no pasa de algunos centímetros o decímetros por segundo, por lo cual los regímenes de inestabilidad de las fracturas se alcanzan mucho más fácilmente.

¿Se producen fenómenos de inestabilidad de las fracturas en las rocas, a gran profundidad? Tal vez el estudio de los materiales blandos en el laboratorio proporcione la respuesta.

Un líquido que comprime el fondo de una fisura deforma el material, el cual almacena energía mecánica. Cuando los enlaces interatómicos son vencidos por las fuerzas aplicadas, esta energía de deformación, liberada, se propaga en forma de una onda de presión (no representada aquí) a lo largo de los flancos de la fisura. La presión se traslada entonces al fondo de la fisura, que prosigue su propagación



El futuro del espectáculo digital



La música, las películas, los videojuegos y la Malla Máxima Mundial se están fundiendo en una sola entidad. Estos medios, hasta ahora diferenciados, abandonan métodos de producción y distribución esencialmente analógicos (películas de celuloide, vehículos de reparto) para constituirse en medios digitales, al par que sus productos convergen hacia una gran corriente de datos numéricos. Es el ocio digital. Vamos a traer el espectáculo a nuestras pantallas de televisión y ordenadores personales, a los relojes de pulsera y automóviles, a los visores integrados en el salpicadero: cuando queramos y donde estemos. En cuanto se resuelvan una serie de diversos problemas legales y técnicos, podremos no sólo disfrutar del mismo, sino también crearlo y distribuirlo.



1. La idea que tiene Sony del entretenimiento digital toma cuerpo en el "teatro personal" Glasstron, mediante un casco con visor y auriculares, y en los potentes gráficos de la PlayStation 2, como los del vídeo *La leyenda de Dragoon*.

La convergencia en los contenidos de los medios, en los canales de distribución, como la televisión por cable o Internet, y en los ordenadores personales, la televisión y los ayudantes personales inalámbricos, pronosticada desde hace años, está por fin empezando a producirse. Ciertos concursos de televisión sincronizan ahora sus emisiones con sitios interactivos de la Telaraña. Empresa hay que está aceptando solicitudes para un servicio que llevará hasta los automóviles el correo electrónico, Internet, archivos musicales MP3 y otras lindezas del entretenimiento digital.

A la vez que transforma nuestro tiempo de ocio, la digitalización de cuanto sea sonoro o videográfico va a trastornar el orden social en la industria del espectáculo. Uno de los primeros síntomas será una limpieza general en la técnica de entretenimiento. Los aparatos de TV, los magnetoscopios e incluso los lectores de DVD podrían quedar barridos por equipos de nuevo cuño, como los "vídeo-grabadores personales". Estas cajas mágicas permiten congelar la imagen de televisión que se está recibiendo en directo, la repetición de una escena o la eliminación de la publicidad, amén de la búsqueda y almacenaje de programas sobre cualquier tema, o protagonizados por nuestros actores favoritos.

Semejante arrumbamiento podría estar también catalizado por máquinas de juegos como la PlayStation 2 de Sony, cuyo microprocesador y cuyas capacidades gráficas rivalizan con las de los ordenadores personales modernos. Sony podría dominar el mundo del ocio digital si lograse firmar un acuerdo con alguna potente empresa distribuidora —por ejemplo, una portadora de TV por cable— para completar la cadena integrada por contenido, distribución y plataforma. La próxima generación de su máquina de juegos, bautizada PS3 por Sony, ofrecerá la posibilidad de efectuar compras en línea y otros servicios interactivos de Internet.

No menos verosímil es que el mundo del entretenimiento resulte también trastocado por matrimonios entre corporaciones rivales. La propuesta de fusión entre Time Warner, gigante estadounidense de los medios de comunicación y de la televisión por cable, y America Online, la mayor proveedora de servicios de Internet, que está pendiente de revisión por la comisión antimonopolio, supone una convergencia de contenido y distribución. Si estas compañías se asociaran con algún fabricante de equipos, también ellas podrían completar una cadena de convergencia.

La difusión pública

El trastorno que la digitalización provocará en el orden social de las compañías de entretenimiento va a obligar a encarar situaciones nuevas. Los sellos discográficos, por ejemplo, están buscando formas provechosas de que los amantes de la música puedan "bajar" canciones por Internet. Tal vez deban dejar de lado la venta de compactos y ofrecer la oportunidad de oír una canción una sola vez, permitir su reproducción ilimitada o primar la suscripción a todo su catálogo a unos precios módicos.

Los particulares van a reclamar espectáculos sobre demanda, y no se conformarán con ser pasivos receptores de lo que a las compañías mediáticas les plazca emitir en cada momento. Las nuevas técnicas permitirán elegir entre las televisiones digitales del mundo, o disponer de música o películas digitalizadas, servidas por Internet. Puede que hacia el 2020, una Internet más robusta, de banda ancha, termine por desplazar a todos los modelos de "difusión amplia" —radio, TV, películas, revistas, libros— como medio principal de distribución de ocio, pronostica Martin

Tobias, fundador de Loudeye, una compañía dedicada a la encriptación y distribución de medios digitalizados.

La creación de contenido será más “democrática”. Hasta ahora, sólo a los grandes estudios de Hollywood les estaba reservada la filmación y distribución de películas o de programas de televisión. Ya no. Las cámaras digitales de cine, de bajo costo, y la edición de vídeo mediante ordenadores personales permitirán la grabación y edición de una película por tan sólo unos pocos miles de euros, y su distribución a través de empresas que sirven vídeo por la Telaraña.

Si le es dada al espectador la facultad de suprimir los anuncios, la publicidad tendrá que adoptar nuevas formas. Las emisoras tendrán que ir haciendo desfilar los anuncios durante los programas por la franja inferior de la pantalla.

¿Cómo se resolverá la disputa sobre los derechos de autor? Los problemas que acosan a los sellos discográficos por causa del trueque de música digitalizada a través de nodos de Internet como MP3 o Napster, se van a reproducir a escala mucho mayor en cuanto lleguen de forma masiva la televisión digital o los filmes digitales. Hoy por hoy, las sedes de la Telaraña que posibilitan la distribución de vídeo digital, como Scour.com, van viento en popa. Empero, a pesar de que el público (joven, en su mayoría) opine que la música y los vídeos deben ser gratuitos a no tardar, porque se encuentran en la Red, la legislación sobre propiedad intelectual y derechos de autor sigue dictando que sean los artistas, los autores o los realizadores cinematográficos quienes controlen los derechos de sus creaciones, y les reconoce su derecho a cobrar. Los legisladores tendrán también que regular nuevos derechos y regalías para “actores digitales”, verosímiles y generados por ordenador, basados en actores reales, que se parecen y actúan como éstos, creados para películas digitales.

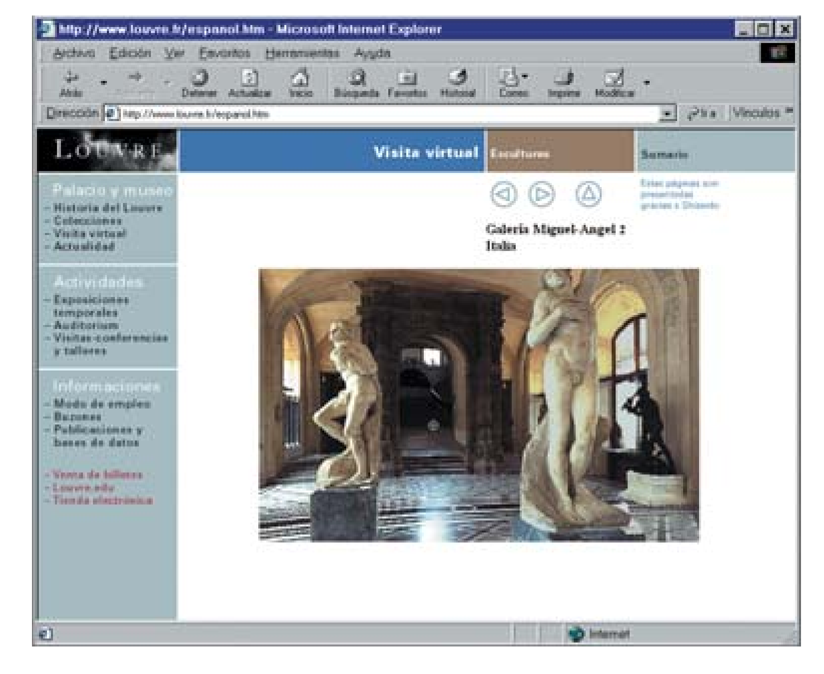
La economía del ocio

La aparición del entretenimiento digital podría provocar cambios sociales. Hay quien sostiene que la economía estadounidense podría centrarse en el entretenimiento. Michael J. Wolf, para quien “no hay negocio sin el negocio del espectáculo”, ha escrito recientemente en *Forbes ASAP* que la mercadotecnia ha de conseguir lo mismo que las cadenas en su programación: “...Ahora tiene que implicar, informar, excitar, cautivar... En pocas palabras, tiene que ser amena y divertida.” El ciclo comercial tradicional podría evolucionar hacia otro similar al de las producciones de Hollywood, que medra con los éxitos y se hunde con los fracasos.

Podrían surgir también cuestiones menos previsibles. El nuevo programa informático de Freenet, que se puede descargar desde freenet.sourceforge.net, permite que los ordenadores personales de la red actúen a modo de nodos transitorios capaces de intercambio directo de archivos, sin intermediarios como Napster. Los usuarios de Napster pueden ser identificados; en cambio, no hay forma de saber quién envía o recibe un archivo mediante Freenet. Los cibernautas pueden copiar directamente archivos de ordenador a ordenador en total anonimato. Las consecuencias son de muy largo alcance. Se podrían efectuar denuncias documentadas sin temor a las represalias; en los estados totalitarios, los disidentes podrían difundir sin riesgo sus alegatos antigubernamentales; pero también la pornografía infantil distribuir sus ilícitas fotos, y los narcotraficantes, cerrar en la Red sus tratos.

Con independencia de que el entretenimiento digital altere profundamente los usos sociales, es seguro que modificará los hábitos de los consumidores. Así lo expresa Robert W. Saint John, fundador de una compañía productora de vídeo digital: “Va a desaparecer la idea misma de tener en las manos un disco compacto o una cinta de vídeo.” Pues, ¿por qué enterrar dinero en adquirir algo enlatado si podemos disponer de todo en el acto, actualizado, portátil y barato?

Es fácil prendarse de la visión de que todo el entretenimiento pasará a ser digital. Los cibernautas pueden ya efectuar visitas virtuales a muchos museos del mundo. La compañía Broadway Digital Entertainment graba en vídeo digital los espectáculos de Broadway para difundirlos a través de Internet en la fórmula de “pago por visión”. Pero por muy verosímiles que puedan ser la visita virtual a un museo, un paseo virtual por la Gran Muralla, o la imagen de un tragafuegos callejero, nunca será lo auténtico.



2. Los internautas pueden darse paseos virtuales por el Louvre y otros museos famosos. Pocos son los bastiones culturales a los que no alcanza la técnica digital.

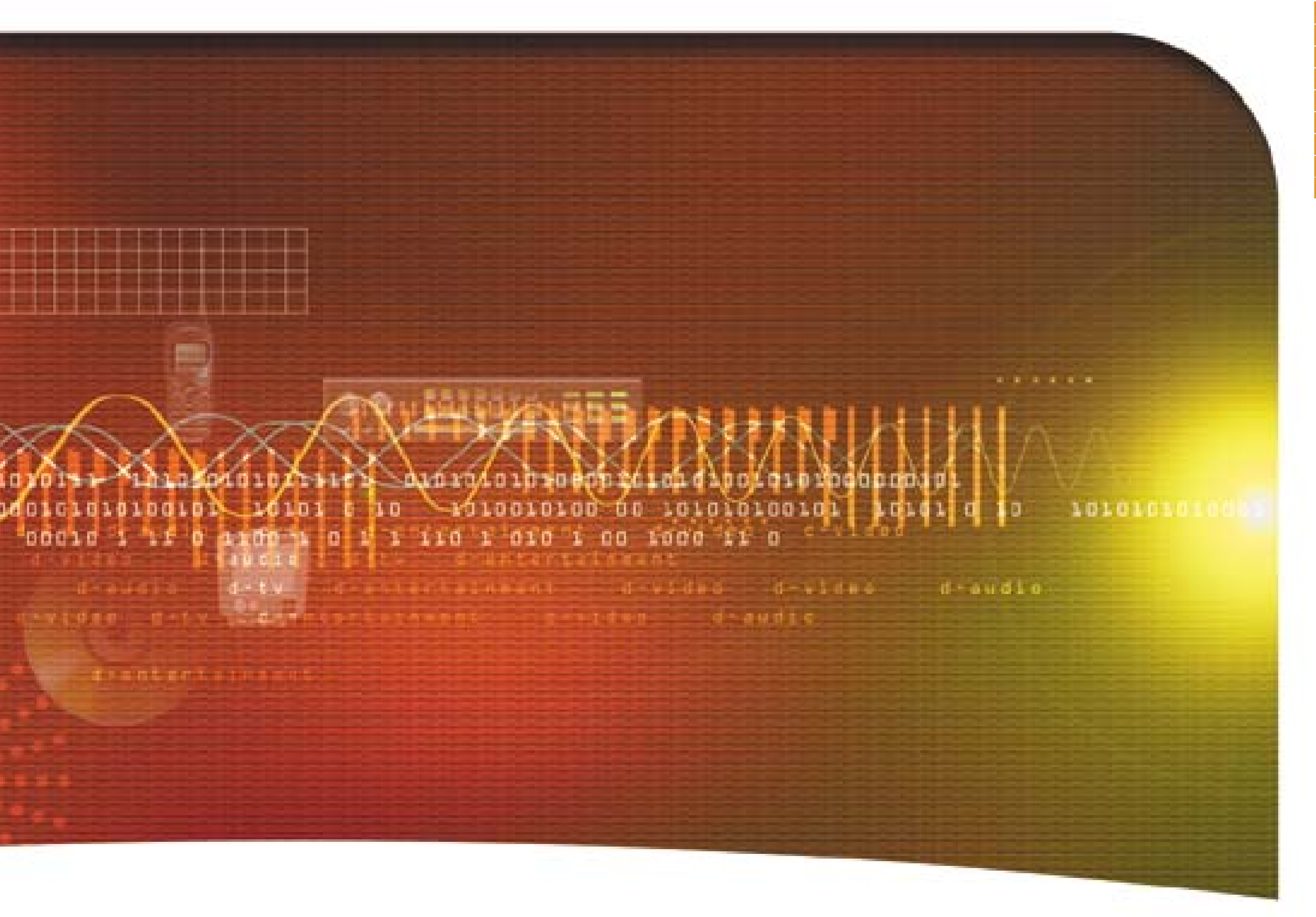
Creación de convergencia

La televisión, las películas, el vídeo por Internet y la música podrían fundirse en un gran flujo de espectáculo digital del que disfrutar con cualquier equipo, en cualesquiera lugares y momentos

Peter Forman y Robert W. Saint John

Entre los grandes hitos de la Exposición Mundial de Nueva York de 1939 descollaba la inauguración de las emisiones de televisión. El receptor instalado en el pabellón de la RCA iba muy por delante de su tiempo. Era tal equipo una combinación de televisión-radio-grabador-reproductor y proyector facsímil, lo que, visto en retrospectiva, hace pensar que los humanos sentimos la necesidad de integrar en un solo ente todos los medios de comunicación. Esa ambición tiene hoy un nombre: convergencia, es decir, la conjunción de audio, vídeo y comunicaciones de datos en una sola fuente, con recepción en un solo aparato y canalizada a través de una sola conexión.

La convergencia, profetizada durante decenios, está por fin saliendo a la luz, aunque de azaroso modo. Los teléfonos móviles, los ordenadores personales y los aparatos de televisión comienzan a asumir cada uno funciones de los otros. Más importante aún es que las formas en que se están interconectando hacen barruntar que nos hallamos prestos a caer de bruces en la convergencia. En cuanto así sea, todas las formas de diversión digital quedarán fundidas en una gran corriente de dígitos binarios. Podremos disfrutar en nuestra sala de estar de películas, de programas de TV, de vídeo por Internet y de música, pero también podremos hacerlo desde nuestro ordenador personal e incluso desde el reloj de pulsera, dondequiera que estemos y cuando nos plazca. Tan sólo falta que los fabricantes de equipos y las entidades de normalización se pongan de acuerdo sobre detalles tales como la distribución de banda ancha, la protección de los derechos de autor y la compatibilidad de los dispositivos de presentación. Ahí es nada.



1. En cuanto los problemas de compatibilidad de estándares y los métodos de protección de datos queden resueltos, el espectáculo digital convergerá en una sola fuente que aflorará, dondequiera que estemos, sobre todo tipo de pantallas.

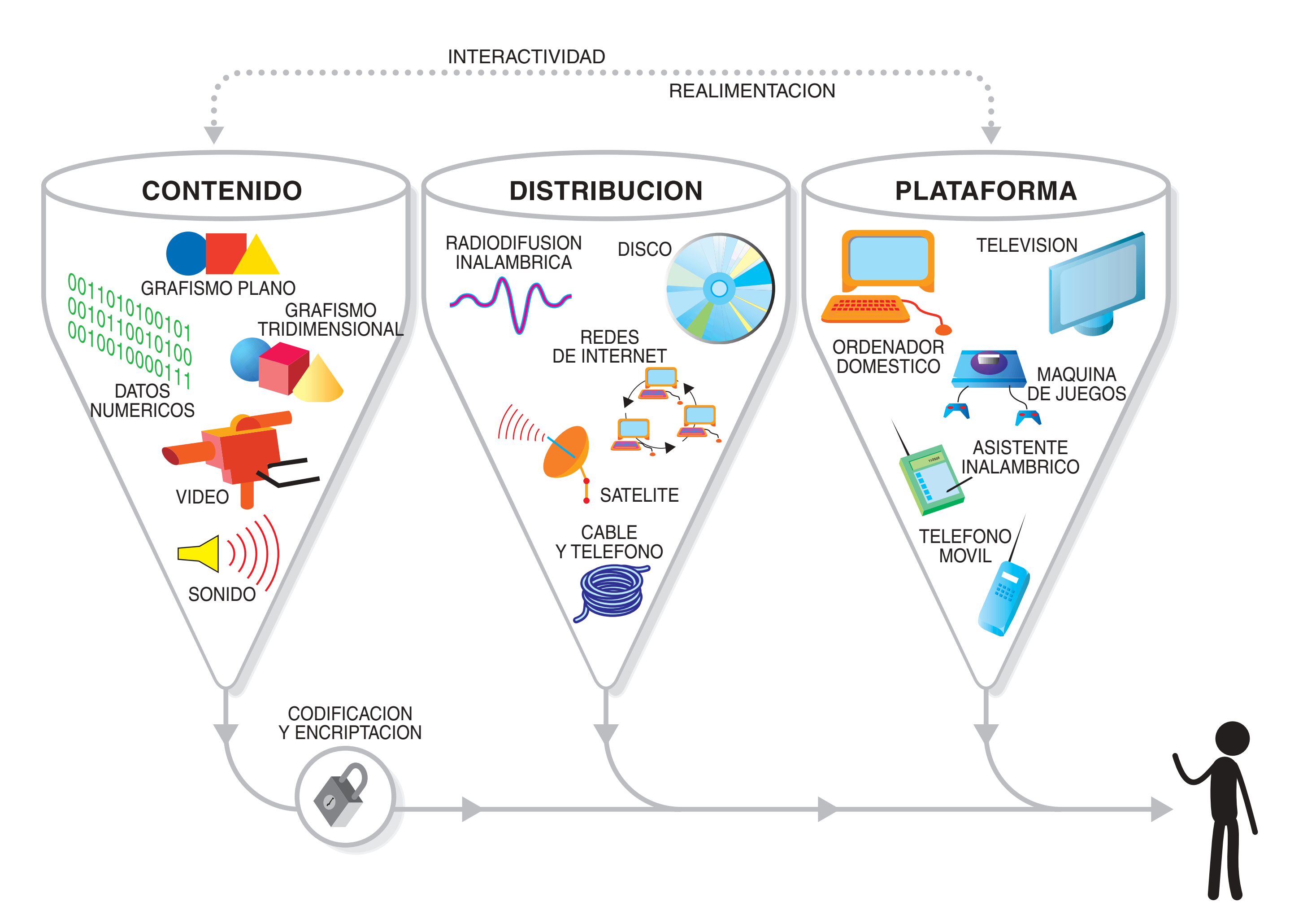
Esa convergencia magna consta de tres subsidiarias: la convergencia de los contenidos (sonido, vídeo y datos), la de las plataformas (ordenador personal, televisión, equipo de Internet y máquina de juegos) y la de las vías o canales de distribución (conductos o formas por los que llegan los contenidos hasta la plataforma).

La Malla Máxima Mundial, acicateada por la "aplicación estrella" que es el correo electrónico, ha acelerado mucho la convergencia de contenidos relativos al mundo del espectáculo. Pero el ascenso de la Telaraña pronto hizo ver que los contenidos deberían ser de escala variable, para poder llevarlos hasta toda clase de plataformas, desde teléfonos móviles hasta aparatos de televisión. Ello ha hecho replantear —y temer— la cuestión de quiénes crean y controlan el propio contenido, que depende de cómo sea empaquetado y de cómo nos es entregado. Por ejemplo, America Online (AOL), mero empaquetador y repartidor de Internet, está intentando fusionarse con Time Warner, uno de los mayores conglomerados mediáticos del mundo. Esta conjunción, que totaliza 180 millardos de dólares, impensable hace apenas unos años, nos parece natural ahora. Por desdicha, poco ayudó Time Warner a tranquilizar a sus rivales, y disipar su temor de que tal fusión pudiera estrangular a la competencia, cuando en mayo de 2000 desconectó temporalmente de sus sistemas de cable a la red ABC de Disney, que llega a millones de hogares norteamericanos. Tal acción podría pesar en la revisión de la fusión que van a efectuar la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) y la Comisión Federal de Comercio. También la distribución ha suscitado temores, provocados por Napster, un programa que permite a los internautas bajar música digital (casi toda, sin licencia), a través de la sede de Napster en la Telaraña, tomada de los ordenadores de otros usuarios.

Aunque no sean éstos los resultados deseados de la convergencia, tales problemas indican que los cambios en el ocio digital tienen tan pocos precedentes, que pueden requerir supervisión gubernamental. Lo único claro en estas aguas cenagosas es la mutua imbricación de los tres elementos de convergencia. Pero las opciones técnicas se hallan peor definidas en las plataformas, dado el número ingente de estándares rivales. La forma en que evolucione esta competencia determinará la presteza y completitud con que se manifieste la convergencia.

Disputa o conmuta

Entre los ejemplos más antiguos de convergencia de plataformas tenemos las tentativas más o menos toscas de la televisión interactiva. La más notable fue el sistema QUBE de Warner Amex, ensayada en los años setenta. La conclusión más clara de este experimento, que supuso un gasto colosal, fue que



2. Las convergencias en el contenido digital, en la distribución de banda ancha y en las plataformas de presentación engendran la magna convergencia del entretenimiento digital y la información, con realimentación que da entrada a la interactividad humana.

el público no tenía interés en comunicarse con la cadena emisora. Hubo de llegar Internet para "enseñar" a los usuarios a interactuar con los contenidos. Aunque el éxito más reciente no supone la convergencia propiamente dicha, sí da un paso en dirección a ella.

En marzo de 2000, la Televisión ABC, propiedad de Disney, en conjunción con una empresa hermana en Internet, Go.com, lanzó en Estados Unidos una versión "potenciada" del concurso *¿Quiere ser millonario?* Los espectadores pueden entrar en la sede *Millionaire* de la Telaraña, y, mientras siguen el concurso por televisión, ir jugando simultáneamente en sus ordenadores. La sede recibió en el primer mes tres millones y medio de visitas. Aun así, este método exige utilizar dos pantallas, con una televisión y un ordenador en la misma sala. Se debate si el equipo definitivo consistirá en un PC/TV o en una TV/PC. Pero cualquiera que sea el equipo que abra el camino, tendrá que superar notables obstáculos.

La televisión digital está avanzando por tres vías: mejora de la resolución, proliferación de canales e interactividad. Algunos progresos están incorporados ya en origen a los aparatos, mientras que otros se instalan en adaptadores externos que conectan el equipo a los proveedores de televisión por cable. En 1995, la ATSC (*Advanced Television Systems Committee*, o sea, comisión de sistemas de televisión avanzada) emitió un conjunto de normas para la televisión digital, al objeto de afrontar los problemas surgidos. Pero su adopción no se realizará de la noche a la mañana. La información digital exige la sustitución o ampliación, costosa, de prácticamente todos los equipos de la cadena de distribución, que ahora son casi todos analógicos, desde la producción, pasando por las emisoras, hasta los receptores.

Una gran preocupación de índole técnica es que el estándar estipulado para la modulación y la transmisión, conocido por 8-VSB (*vestigial sideband*, banda lateral residual), puede ser inadecuado para la recepción fiable por antena, y son muchos quienes carecen aún de servicio por cable o por satélite. Pero ni siquiera con una nueva antena digital puede el usuario mejorar fácilmente la recepción buscando un emplazamiento óptimo: las señales de televisión digital, o se reciben con total exactitud, o no se reciben en absoluto. Algunos fabricantes y algunas cadenas se inclinan por adoptar el sistema europeo COFDM (*coded orthogonal frequency division multiplex*, multiplex por división ortogonal codificada de frecuencia), más robusto, y que, según ellos, resolvería el problema.

Otros, nada convencidos, se niegan a usar equipos COFDM, porque ya existen en el mercado norteamericano emisoras y receptores basados en 8-VSB. Opinan que el nuevo cambio retrasaría al menos cinco años la implantación de la televisión digital. Con este panorama, es

improbable que los consumidores decidan reemplazar sus receptores analógicos por otros digitales. La mayoría de los expertos esperan que la transición completa requiera de 10 a 15 años.

Otra cuestión es el destino de la anchura de banda adicional. Algunos líderes de la industria se inclinan por dedicarla a televisión de alta definición (HDTV), cuya resolución es mayor que la de la televisión de definición estándar (SDTV). Otros opinan que la ampliación del ancho de banda debería ser utilizada para varios canales de SDTV. Otros, aún, quieren ofrecer resoluciones algo mejores para ciertos tipos de contenido, junto con multidifusión e interactividad.

Un aparato de televisión capaz de soportar todos estos formatos será caro. Para reducir los costos será necesaria la producción en masa. Mientras no exista un contenido digital lo bastante atractivo, los consumidores se limitarán a posponer sus compras. A pesar de esta situación, la industria del ocio digital se da perfecta cuenta del valor determinante del contenido, y está investigando para dar con las fórmulas de contenido digital capaces de llevar a los consumidores a una plataforma plenamente digital.

En TV digital, los EE.UU. van por detrás del resto del mundo desarrollado. El Japón hará digital su servicio de televisión de alta definición en 2002. En Europa, es el Reino Unido el más adelantado, si bien emite en televisión estándar de pantalla apaisada en lugar de hacerlo en alta definición. Por desdicha, el Japón, los EE.UU. y Europa proponen diferentes estándares de televisión. En un mundo ideal todos nos atendríamos a un mismo estándar, pero razones políticas, sumadas al chauvinismo nacionalista, parecen impedirlo.

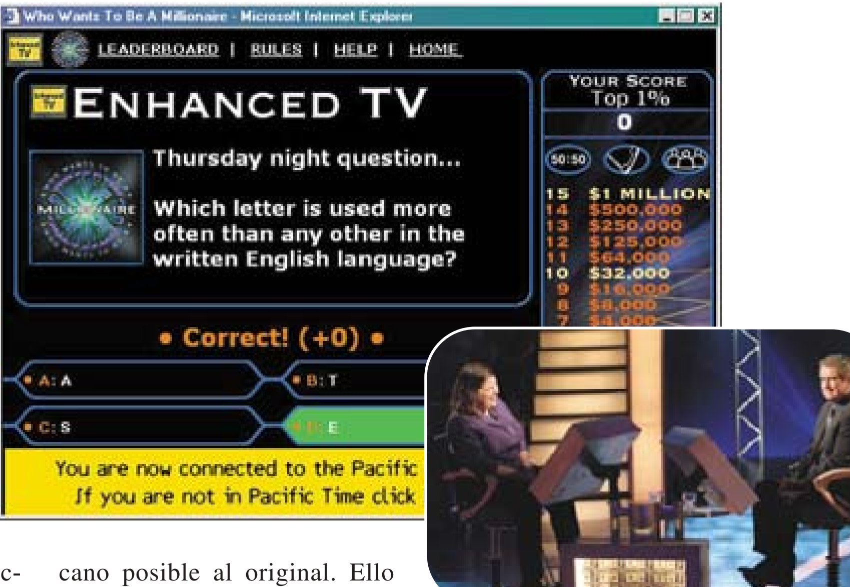
Todavía más difícil es encontrar auténtica televisión interactiva (TVI). Los estándares ATSC (televisión por cable en EE.UU.) y el DVB europeo no se ocupan todavía de la TVI, aunque en Europa se están implantando algunos sistemas. Tal vez la chispa de encendido la genere Open TV, una compañía californiana fundada por AOL, Time Warner y News Corp. Esta compañía proporciona los programas informáticos de alto y medio nivel (la arquitectura técnica) necesarios para interconectar a la emisora de TVI con el espectador, que ofrece bajo licencia a los operadores de cable. Los programas se utilizan en cerca de ocho millones de adaptadores, repartidos por todo el mundo, para compañías de cable como BSkyB, del Reino Unido, y la PrimaCom AG alemana. Está basado en parte en lenguajes estándar de la Telaraña, como el HTML, y adoptará a no tardar el XML, más moderno.

Los adaptadores prestan soporte a las características interactivas como las guías electrónicas de programas, correo electrónico, compras en línea, vídeo sobre pedido y publicidad a la medida. Entretanto, la compañía británica Cable & Wireless Communications y otras utilizan la plataforma Liberate ITV (basada en HTML y JavaScript) para entregar servicios interactivos a través de módems de cable coaxial, como el reparto de compras en el supermercado y servicios bancarios, amén de teléfono, correo electrónico y televisión digital.

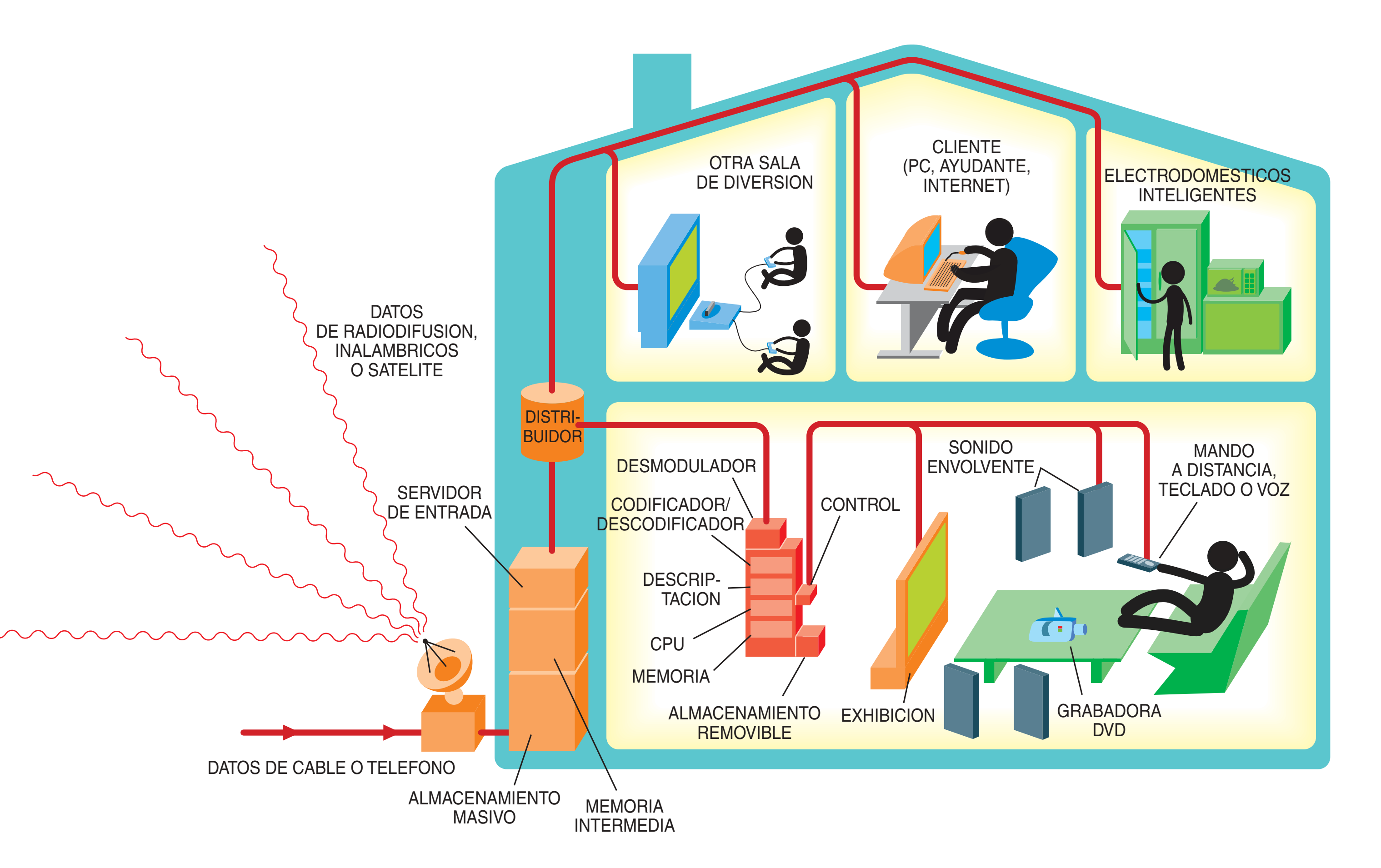
La National Cable Television Association pronostica que los EE.UU. podrían ponerse a la par durante 2001, cuando el 75 por ciento de los sistemas de cable dispongan de anchura de banda suficiente para los servicios interactivos. La coaxial no es la única vía de suministro de la TVI, pero sí la de mayor penetración en el mercado estadounidense. Al mismo tiempo, se ha formado una alianza transversal de compañías de teledifusión y de informática, llamada Advanced Television Enhancement Forum, que busca proporcionar un entorno común para el desarrollo para la TVI utilizando HTLM, XML y JavaScript. Entre otras iniciativas de ámbito más local podemos contar la DVB Multimedia Home Platform europea, el conjunto de programas Digital TV Application Software Environment y la norma de TVI japonesa.

En la televisión digital no todo es caos potencial. La industria ha llegado a un acuerdo sobre un método de compresión de vídeo que permita una transmisión más rápida y que luego, descomprimido, ofrezca un aspecto lo más cercano posible al original. Ello se consigue mediante un codec (compresor/descompresor) basado en algoritmos muy elaborados. El codec estándar para TV digital es MPEG-2, que recibe su nombre del Motion Picture Experts Group. Funciona con cualquier plataforma de presentación y se ha convertido en la norma general para televisión digital, televisión por cable, emisión directa desde satélites y videodisco digital (DVD).

La comisión MPEG ha venido trabajando en un estándar de codec de nueva generación, el MPEG-4, que está, por muchos conceptos, definido por la convergencia. El MPEG-4 supone el perfeccionamiento necesario para prestar so-



3. En EE.UU. el sitio de *¿Quiere ser millonario?* permite a los espectadores participar en el juego en tiempo real, mientras se emite este concurso de televisión, lo que supone un paso importante hacia los medios interactivos.



4. En los hogares, una variedad de interfaces permitirán disfrutar y controlar una corriente digital afluyente, compuesta por televisión, sonido y datos numéricos, con gestión central; se distribuirá por la vivienda mediante líneas de conducción o por enlaces inalámbricos.

porte a un vídeo digital de alta calidad, fluyente en directo desde Internet, sin olvidar los datos que especifiquen elementos interactivos. Puede incluso enviar vídeo a tasas de transmisión muy bajas (a partir de 5 kilobits por segundo), manejables por redes de telefonía inalámbrica móvil. El MPEG-4, un estándar abierto, será el motor para el vídeo digital de la electrónica de consumo del futuro.

En busca de la aplicación definitiva

Toda esta técnica requiere un equipo de conexión y descodificación mucho más complejo que el instalado en una televisión normal. Aunque empieza a verse en el mercado algunos receptores de televisión vía satélite y de cable digital, no están capacitados para recibir emisiones radiadas de TV digital. En la electrónica de consumo sigue haciendo falta un aparato que lleve integrado un receptor de TV digital. Se requiere un equipo de TV digital "definitivo", que podría surgir de cualquiera de las tres actuales aplicaciones de televisión: el DVD reproductor/grabador, las televisiones personales y las máquinas de juegos.

Los lectores de DVD se han introducido con notable éxito en el mercado de electrónica de consumo. Un DVD puede almacenar más de 2 horas de vídeo digital MPEG-2 de mediana definición, juntamente con múltiples bandas sonoras de alta calidad, información de navegación y gráficos. Algunos están provistos también de características interactivas. Es seguro que los reproductores previstos para el año 2001 terminarán por desplazar a los magnetoscopios domésticos, así como a las unidades de CD-ROM de los ordenadores, haciendo que datos numéricos, sonido y vídeo converjan en un solo medio, al menos en el ordenador personal.

El videograbador personal, o la televisión personal, es un segundo equipo prometedor de convergencia, lanzado al mercado en el año 2000. Se trata de un disco rígido de almacenamiento masivo para televisión. El programa que se recibe, se guarda con formato MPEG-2, reservado en el disco. El espectador puede detener la imagen o reanudar la reproducción mientras el equipo sigue grabando la transmisión en directo, lo que le permite crear repeticiones instantáneas o eliminar los anuncios. El individuo puede programar sus preferencias de visión, como "deportes en directo" u "ópera", y el dispositivo registrará tales emisiones en "canales virtuales" que podrán verse posteriormente. La máquina puede también explorar listados electrónicos en busca de programas similares y captarlos de una manera automática. Este tipo de grabación "inteligente", el acceso a guías de programación ampliadas, y la "pausa en vivo" van a ser tres funciones exigidas en el ámbito del espectáculo digital del futuro.

El tercer precursor de la plataforma digital definitiva es la muy popular consola de videojuegos. El lanzamiento de Dreamcast, de Sega, en 1999, con su módem de 56K, marcó el despegue de una máquina de juegos que permitía a los jugadores competir entre sí por Internet. En el otoño de 2000, Sony elevó las apuestas con la PlayStation 2, que contiene un lector de DVD, sonido Dolby digital y sonido

DTS, juntamente con una CPU y un procesador de gráficos capaces de rivalizar con los de un ordenador personal moderno. Aunque en principio no se venderá con módem, en breve se conectará a ellos. Más interesante aún ha sido la reciente declaración de Sony, indicando que proyecta otorgar licencias de su técnica a terceras partes, por lo que el soporte podría empezar a aparecer en televisores, en adaptadores, en ordenadores personales e incluso en otras máquinas de juegos.

El ordenador de entretenimiento

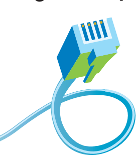
Las técnicas de televisión podrían tropezar con obstáculos más elementales. Podrían, por ejemplo, requerir una interfaz más compleja que el mando a distancia típico de la televisión, aunque no tan voluminoso como el teclado del ordenador. Ninguna de las técnicas proporciona una interactividad cómoda. Y el dispositivo "todo en uno" puede permanecer eternamente en la lista de los buenos deseos si la competencia entre fabricantes obliga a los consumidores a erigir una pila cada vez más alta de accesorios junto a las pantallas de sus aparatos. Ante tales incertidumbres, el motor de la convergencia podrían ser el ordenador personal y la Telaraña.

Con un mercado al que están llegando microprocesadores de 1 gigaherzt, acompañados de discos rígidos de 40 gigaoctetos por 300 euros, amén de potentes procesadores gráficos para la manipulación y presentación de vídeo, fácil interactividad en línea, y con los DVD regrabables a la vuelta de la esquina, el ordenador personal está listo para ocupar su lugar como plataforma de espectáculo digital.

La discusión de si será el ordenador o la TV lo que conduzca a un electrodoméstico convergente remeda el debate sobre si los sistemas red/cliente deberían ser "gruesos" o "flacos", de hace unos años. Los proponentes de sistemas "flacos" —las compañías Sun, Oracle y Java— veían un mundo poblado con sencillas cajas multimedia, sin disco rígido, que se limitarían a descargar aplicaciones (y por tanto, entretenimiento) de la Red siempre que se desease. Estas compañías formaron frente a la vieja guardia —Microsoft, Intel, Dell, Compaq—, que deseaba seguir vendiendo voluminosos ordenadores atiborrados de almacenamiento y programas. En el mundo del entretenimiento digital, la TV es un cliente flaco, y el ordenador multimediático, la opción gruesa. Quien acabe por vencer es cosa que depende de los mismos problemas no resueltos: ¿Dónde se almacenarán los archivos? ¿Re-

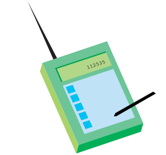
La batalla de la distribución

Puede que sean los modelos económicos, más que la técnica, los determinantes de la forma en que nos llegará la diversión digital. Ahora bien, cualquiera que acabe siendo el sistema vencedor, su capacidad de transmisión habrá de superar los 100 megabits por segundo (Mbps). He aquí las opciones, que tendrán que mejorar:

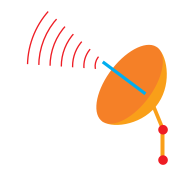


Red telefónica
Casi ubicua, pero la velocidad del módem estándar de 56 kilobits por segundo (Kbps) no es suficiente ni para empezar a recibir entretenimiento digital. Una conexión DSL (línea de suscriptor digital) asimétrica, permanentemente activa, proporciona velocidades de hasta 1,5 Mbps. La DSL de muy alta velocidad promete alcanzar los 60 Mbps. Pero la DSL no puede llevar las transmisiones a distancias de más de 5 kilómetros de la subcentral local y muchas personas quedarían sin servicio.

Televisión por cable
Las compañías han estado tendiendo sistemas híbridos de fibra óptica y cable coaxial para elevar la capacidad de transporte hasta los 6 Mbps por lo menos, pero la competencia de las cadenas de televisión tradicionales, las peticiones de las compañías telefónicas y el suministro de servicios de Internet las ha desviado bastante de esa labor. La eventual integración de la transmisión de banda ancha, del contenido y de la conexión bidireccional convertirá a las compañías de cable en las más formidables suministradoras de entretenimiento digital.



Sistemas inalámbricos fijos
Pueden proporcionar tasas de acceso de hasta 2 Mbps; son idóneos para zonas rurales, donde no hay cable ni DSL. El enlace se establece mediante estaciones de radio y una antena de tejado. Es la única forma de conectar a la Red los teléfonos digitales PCS y los ordenadores de bolsillo.



Satélite
Hughes Network Systems, proveedora de DirecTV, ofrece también DirecPC para efectuar descargas de Internet a tasas de hasta 400 kbps. Empero, los datos de salida han de ser enviados por módem, lo que ocasiona demoras apreciables. Existen unos pocos sistemas bidireccionales auténticamente interactivos; son muy caros.

Televisión radiodifundida
Las emisoras siguen dependiendo del limitado ancho de banda 6 MHz/19,39 Mbps asignado a cada canal. La compresión MPEG consiente a las cadenas la opción de enviar una señal de televisión de alta definición o cuatro señales normales, o alguna combinación de vídeo, sonido y datos numéricos. Pero la interacción bidireccional exige un segundo enlace.

sidirán el poder y el control en manos del consumidor o de la red? ¿Cuánta complejidad van a admitir los consumidores a cambio de mayor número de funciones?

No faltan buenas razones en favor del ordenador personal grueso. Permite crear, almacenar y compartir los medios; la televisión no hace nada de esto. Merced a las economías de escala han caído los precios. Y en un mundo de estándares televisivos complicados y en competencia, podría tener sentido adoptar un ordenador genérico, programable, capaz de aunarlos, en vez de adquirir y tratar de conectar al aparato de televisión todo un rimero de periféricos.

El ordenador personal posee también la facultad exclusiva de producir y recibir flujos mediáticos a través de Internet. Tal capacidad, reproducida "en vivo", conforme el internauta la recibe, ha permitido las estaciones de radio en Internet y la prosperidad de compañías que distribuyen películas de pequeños realizadores independientes. Ha posibilitado también que compañías de entretenimiento establecidas distribuyan contenidos que no tendrían otra salida.

La difusión de medios por flujo de datos digitales desempeñará un papel importante en el ámbito del espectáculo digital, pero, a causa de su baja resolución, no será uno de sus motores fundamentales. El vídeo con calidad de televisión exige un ancho de banda del que no disponen en sus ordenadores la mayoría de los usuarios. Además, la actual arquitectura IP de Internet no es lo bastante robusta. Los flujos mediáticos sufren del congestionamiento y de los puntos débiles de la Red, al tener que pasar por dispositivos no previstos para este tipo de demanda. Algunas empresas proporcionan cierto alivio al almacenar temporalmente los flujos de gran demanda en servidores reservados a este fin, próximos a los usuarios finales; eso no basta, sin embargo, para ofrecer de extremo a extremo la calidad de servicio que exigen las emisoras y los espectadores. La incesante proliferación de conexiones de banda ancha, y las iniciativas para perfeccionar Internet, como la IP versión 6, contribuirán a resolver estas deficiencias.

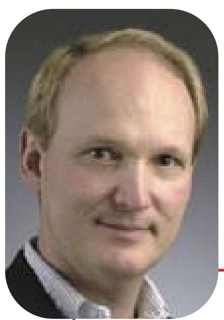
Otro problema son las arquitecturas patentadas, de propiedad particular, y los codecs propiedad de ciertas compañías. Los fabricantes de equipos no construirán nunca sistemas basados en programas que no estén abiertos y se atengan a un estándar certificado. Los creadores de programas tendrán que avenirse voluntariamente a ello si desean que sus productos operen conjuntamente en modo convergente.

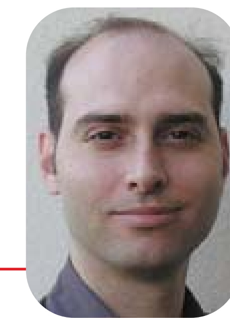
Si todos estos avances se dieran, un flujo de datos codificados en MPEG-4 que llegase a nuestro ordenador a través de una conexión de banda ancha sería indistinguible de la televisión por cable, y nosotros podríamos almacenar o editar dichos vídeos, así como distribuir los nuestros propios. El obstáculo siguiente podría ser el propio ordenador. Pese a toda su gloria, el ordenador personal sigue siendo falible, debido a la complejidad de su sistema operativo. Los ordenadores, incluso los mejores, se bloquean.

De vuelta al hogar

Por ahora, podríamos concluir que son tantas las técnicas de convergencia, y tantos los ajustes que requiere, que para el consumidor es sólo una pesadilla. No se olvide, empero, que la introducción del ordenador personal y la de Internet estuvieron repletas de equipos y estándares en dura competencia, y eso no impidió su clamoroso éxito.

A corto plazo, es de suponer que casi toda la convergencia que podamos experimentar resulte de una combinación de distintos dispositivos, muchos de ellos conectados "por línea" a Internet, aunque no necesariamente entre sí. Estos aparatos irán asumiendo funciones comunes y adquiriendo mayor potencia. Surgirán diversas soluciones "universales", de características similares, que probablemente estén enlazadas en nuestro domicilio por una red de área local inalámbrica de banda ancha, gestionada desde un potente servidor central alojado en un cuartito o en el sótano. El servidor mantendrá una conexión de banda ancha casi permanente con el mundo exterior, por enlaces de fibra óptica o vía satélite. Vamos a vivir en un mundo de múltiples dispositivos, de múltiples redes y de contenido a todas las escalas, mantenido de una pieza por una conectividad invisible.





Los autores

PETER FORMAN y ROBERT W. SAINT JOHN fueron creadores de programas informáticos de convergencia en Ligos Corp. a finales del decenio pasado. Forman es presidente y ejecutivo jefe de Ligos en San Francisco, una empresa especializada en técnica de codificación y descodificación para vídeo y audio en tiempo real. Saint John es productor independiente de vídeo y consultor de multimedios en San Diego. Su compañía, Nearly News Productions, se centra en la producción de vídeo para videodiscos, Internet y las futuras plataformas digitales.

Bibliografía complementaria

VIDEO COMPRESSION. Peter D. Symes. MacGraw-Hill, 1998.

THE GUIDE TO DIGITAL TELEVISION. Dirigido por Michael Silbergleid y Mark J. Pescatore. Miller-Freeman, 1999.

DIGITAL CONVERGENCE. Andy Covell. Aegis Publishing Group, 2000.

SAM'S DIGITAL TELEVISION REPORT (www.teleport.com/~samc/hdtv).

CONSUMER ELECTRONICS ASSOCIATION (www.digitaltelevision.com).



Guerra en la música

La distribución a través de Internet de sonido digital de calidad progresa a un ritmo acelerado. Pero le han salido al paso el escollo de los derechos de autor y otros problemas jurídicos que empiezan a dirimirse en los tribunales Ken C. Pohlmann

Tanta es la rapidez con que avanza la técnica de digitalización del sonido, que el negocio musical está perdiendo negocio. La industria discográfica está tocando a rebato para habérselas con los nuevos formatos y modos de distribución, que amenazan su hegemonía en la difusión y venta de grabaciones musicales. La creciente popularidad de Internet en la diseminación de registros musicales ha desatado cambios irreversibles en la forma en que el público espera disfrutar de la música. Ya están aquí nociones tenidas por "futuristas", como la música sobre pedido, el acceso pleno a los catálogos de las discográficas y la posibilidad de envolvernos gratuitamente en un flujo regular de música recién creada. La música plasmada en "datos" está definiendo un paradigma novedoso en la producción y distribución de registros, que tiene confundidos a sus propios creadores. Y por el horizonte asoman problemas aún más serios para las películas y TV digitales. Para todas las versiones digitales del ocio, en resumen.

1. El volcado gratuito de archivos musicales en ordenadores o en reproductores portátiles de MP3, como Rio (*en el inserto*), realizado a través de nodos de la Red, como Napster (*arriba*), ha suscitado una serie de contramedidas para la protección de los derechos de los artistas y de los sellos discográficos.

Lo paradójico de la situación es que músicos, sellos discográficos y consumidores hallábanse perfectamente a gusto con los discos compactos y sus reproductores, en la actualidad ubicuos, baratos de fabricar, fiables y fáciles de utilizar. Los discos compactos, por ser legibles tanto los equipos estereofónicos como los ordenadores, han sido un soporte musical casi perfecto. Pero la técnica no descansa. La batalla en curso, centrada en la distribución de registros musicales por la Red, está impulsada por la forma en que la grabación musical es producida y reproducida, así como por la posibilidad de la técnica de vulnerar los derechos de propiedad intelectual.

En una grabación digital se van tomando sucesivas muestras ("muestreo") de la señal sonora; la amplitud de cada muestra se anota en una "palabra" digital. La calidad final del registro es función de la frecuencia de muestreo y de la longitud de la palabra: cuanto más elevada sea la tasa de muestreo, mejor será la respuesta en frecuencia del registro; cuanto mayor sea la longitud de la palabra, menor será el ruido.

La norma de la industria de grabación de CD musicales estipula una frecuencia de mues-



2. El copiado de piezas musicales a través de Internet se realiza de forma sencilla y gratuita mediante programas como MP3 y Napster, libremente disponibles en la Red.

treo de 44,1 kilohertz (kHz) y una longitud de palabra de 16 bits. Ello supone el registro de 1,41 megabits por segundo (Mbps), con lo que se obtiene una fidelidad adecuada, aunque no consiente una transmisión rápida vía Internet. En función del tráfico de la Red, con un módem típico de 56K se tardarían unos 90 minutos en recibir uno solo de los cortes de un CD, de unos tres minutos de duración. Una solución podría consistir en reducir la frecuencia de muestreo, pero con ello se degrada la fidelidad (más concretamente, la respuesta de frecuencia).

Una técnica más sagaz consiste en reducir la longitud de la palabra. Se aumenta así el ruido; sin embargo, los métodos de codificación perceptual permiten a los ingenieros acortar, con buenos resultados, la longitud de la palabra. Un codificador desprecia las partes de la señal musical digital que son inaudibles y reduce la cantidad de datos necesarios para el correcto envío de sonidos. El resultado final puede variar, según la tasa de bits, desde casi indistinguible de la señal original hasta tornarse imposible de escuchar.

La familia de estos algoritmos de codificación perceptiva que domina la industria de audio ha sido ideada por el grupo MPEG (*Moving Picture Experts Group*, grupo de expertos en cinematografía). Uno de los estándares de MPEG define un codificador de "Capa 3", conocido por MP3, que utiliza para el sonido estereofónico frecuencias de muestreo que van de 64 a 320 kilobits por segundo (kbps). A una frecuencia de 128 kbps se consigue una razón de compresión de 11:1 con respecto a la grabación de un CD, la cual consiente una transmisión bastante rápida por los canales normales de Internet. A tasas inferiores a 128 kbps se introduce, por lo general, distorsión audible, mientras que con tasas superiores a 192 kbps el sonido debería parecer idéntico al procedente de un CD original.

Aunque las tasas bajas (como la de 64 kbps) puedan hoy ser necesarias debido a las limitaciones de los módems telefónicos, las elevadas (192 kbps o más) se convertirán en norma conforme se establezca mayor número de conexiones de banda ancha. En cualquier caso, el estándar MP3 reduce los archivos de música digital a tamaños más manejables. A 128 kbps, aquel mismo corte de CD de tres minutos de duración podría ser transmitido en unos 8 minutos con un módem de 56 K. Por otra parte, un disco rígido de 20 gigaoctetos podría alojar unos 300 álbumes digitales, transformando un ordenador personal en una auténtica máquina de discos digital.

La difusión del MP3 ha desencadenado un cambio fundamental en el negocio musical. Los particulares pueden ahora transformar los discos compactos en archivos MP3 (lo que en la jerga se conoce por "rajado") merced a programas "rajadores MP3" o "ladrones de compactos" (por seguir en el argot). El usuario inserta un compacto musical en su ordenador y se sirve de un programa de codificación para condensarlo en un pulcro archivo en formato MP3. Esta persona puede ahora remitir, desde su propio ordenador o sitio de la Telaraña, el archivo sustraído poniéndolo a disposición pública.

Apropiación sin tasa en MP3

Y aquí empiezan los problemas. La conversión de nuestros propios CD al formato MP3 no es ilegal mientras la copia se destine a uso propio; por ejemplo, para escucharla en nuestro reproductor de MP3. En cambio, la redistribución pública de música sin la autorización del poseedor de los derechos de autor sí vulnera la ley de propiedad intelectual. La RIAA (*Recording Industry Association of America*) y otras organizaciones similares sostienen que la remisión de archivos MP3 vulnera los derechos de autor, y se han enfrentado a grandes sedes de intercambio de MP3, como la tristemente famosa Napster. Los particulares, utilizando programas cuya difusión es gratuita, pueden localizar canciones en formato MP3 en los discos

rígidos de otras personas que en ese momento se encuentren conectadas a Napster, y copiarlas gratis. Dado que las copias residen en millares de sitios de la Red, y van y vienen a través de conexiones con Napster, resulta difícil inculpar a nadie en particular. Por ello, la RIAA y algunos grupos musicales, como Metallica, se han querellado contra Napster, y la han acusado de complicidad en delitos contra la propiedad intelectual.

Pero no se puede poner puertas al campo. Una idea sagaz engendra otra. Un programa llamado Gnutella permite que dos usuarios de Internet se intercambien directamente archivos MP3, sin necesidad de encaminarlos a través de un servidor central, como Napster. El programa Gnutella, desarrollado por Nullsoft (la compañía que ha creado, asimismo, WinAmp, el más popular de los programas de audición de MP3), está disponible en versión beta descargable por la Red. Nullsoft es propiedad de America On Line (AOL), compañía que aspira a fusionarse con Time Warner, dueña de Warner Music, que a su vez se opone al sistema MP3. No sorprende, pues, que la sede de Gnutella fuera declarada "proyecto por cuenta propia, no autorizado" y clausurada por sus propios administradores. Pero se habían distribuido ya un millar de copias. El genio había escapado de la botella y empezaron a surgir por todas partes clónicos de Gnutella.

La proliferación de archivos MP3 pasados de forma subrepticia y de programas como Napster y Gnutella revela cuán eficiente es la distribución de música digital por Internet y lo muy difícil que es controlar dicha distribución. A pesar de la batalla legal, los fabricantes de equipos están empezando a dar entrada a este formato. Los lectores de compactos permiten reproducir no sólo los CD normales, sino también discos con ficheros MP3. Entretanto, los lectores portátiles de MP3, como Rio y Rave, han adquirido una popularidad extraordinaria. Están provistos de tarjetas de memoria no volátil (la misma memoria "flash" utilizada en cámaras fotográficas digitales) capaces de almacenar archivos volcados desde un ordenador personal. Un reproductor provisto de una memoria de 64 megaoctetos alberga alrededor de 66 minutos de música codificada de una calidad de 128 kbps.

Las redes descentralizadas "de igual a igual", como Freenet, van un paso más allá que Gnutella. Se valen de encaminamiento inteligente y de sistemas de almacenamiento invisible ("caché"), que permiten transferencias anónimas de unos ordenadores a otros, haciendo imposible la identificación del remitente o de quién ha descargado un archivo transmitido. Las querellas, los mandamientos judiciales y las revocaciones han sido el azote de Napster y otras sedes de intercambio de MP3. El problema al que se enfrentan las firmas discográficas consiste en impedir la copia no autorizada y ofrecer al mismo tiempo, por Internet, un producto que el usuario esté dispuesto a pagar. Uno de los enclaves de descarga más populares, MP3.com, ha resuelto las querellas que tenía y alcanzado acuerdos de distribución con diversos sellos discográficos. Pero en septiembre pasado, MP3.com perdió un litigio con Universal Music, la mayor de todas las discográficas.

Irá en beneficio de todos que cuestiones como ésta queden debidamente zanjadas, pues van a replantearse, a mayor escala, cuando se disponga en línea de vídeo digital de calidad. Gnutella, por ejemplo, permite no sólo el intercambio de ficheros de sonido, sino también de vídeo. Se trata de un campo muy controvertido, al tiempo que las querellas sobre la publicación del protocolo de encriptación del DVD de vídeo parecen ir camino del Tribunal Supremo de los EE.UU.



3. En una sesión de la Comisión Judicial del Senado de los EE.UU., celebrada en julio de 2000, sobre la infracción de derechos de autor, los músicos Roger McGuinn, de los Byrds (*izquierda*), y Lars Ulrich, de Metallica (*centro*), le manifiestan su disgusto a Hank Barry, de Napster, por este nodo de la Red dedicado al intercambio de canciones.

La seguridad y la fractura del DVD

La industria musical ha respondido también a la popularidad de los archivos MP3 no regulados desarrollando su propia especificación SDMI (*Secure Digital Music Initiative*, iniciativa de música digital segura), ideada para perfeccionar el sistema SCMS de protección contra copiado (*Serial Copy Management System*, sistema de gestión de copias en serie) que se utiliza en el actual formato CD. El SCMS es frágil: mediante un solo bit se determina si un disco puede ser copiado o no. Aunque sirve para evitar la piratería más burda, cuando se descerraja un CD, el bit de prohibición queda eliminado. En el protocolo SDMI, los datos musicales serán codificados y certificados, por lo que los usuarios no podrán convertir un corte del compacto en un archivo MP3 apto para envío por Internet si no disponen de la clave de desencriptación.

Además, los dispositivos que se atengan al SDMI no aceptarán la reproducción de archivos SDMI ilícitamente copiados. El protocolo SDMI permite también imprimir sellos de agua electrónicos que denunciarán el origen de las copias ilegales. Los archivos de música digital

pueden ser encriptados y desencriptados sin que sufra su fidelidad. Los sellos de agua, empero, insertan un código en la señal sonora, y se ha de tener gran cuidado para evitar que sean audibles. Ello reviste importancia especial, pues incluso las compañías discográficas contemplan que, en un futuro no lejano, los clientes puedan conectarse a ellas, oír muestras de música y después adquirir y descargar sus selecciones hasta equipos de reproducción MP3, o grabarlas en sus propios discos compactos.

Los patrocinadores del SDMI esperan evitar el desliz que condujo a la desencriptación de los videodiscos digitales, el formato de vídeo de máxima novedad. Los discos DVD-Vídeo están encriptados por el sistema de codificación del contenido, o CSS (*Content Scrambling System*). Para desencriptar la información de imagen y sonido se requiere una clave de 40 bits. Cada fabricante posee una clave propia y exclusiva. En consecuencia, en cada DVD-Vídeo residen 400 de las claves de 40 dígitos. Los licenciatarios de técnica de vídeo tenían la obligación de encriptar sus claves, pero uno de ellos no lo hizo. El grupo noruego MoRE (*Masters of Reverse Engineering*, amos de la ingeniería inversa), fundado por adolescentes, procedió a "desconstruir" el reproductor de vídeo de Xing Technologies, y desbloqueó su clave. Después, MoRE consiguió averiguar más de 170 claves por el método de tanteo. Aunque MoRE ha de afrontar varias querellas, nadie imagina que la clave de desencriptación pueda volver a ser secreta.

La disponibilidad sin restricciones de los ficheros MP3 pone en entredicho el *statu quo*. Los partidarios de Napster, Gnutella, Freenet y demás sueñan con poner fin a una era en la que un oligopolio de grandes compañías domina la comercialización de la música. Prevén una democratización de la música, en la que pequeños sellos discográficos puedan ser competitivos en un mercado virtual. Millares de artistas independientes podrían así vender directamente su música a los particulares, sin necesidad de distribuirla a través de firmas discográficas, lo que haría comercialmente viable un repertorio mucho más amplio de grabaciones. Tal renacimiento podría rebajar los costos a los consumidores y aumentar los ingresos de los artistas.

Otra de las opciones de transmisión, el flujo digital directo (*streaming*), ha resultado menos ofensiva. Los algoritmos de compresión de datos reducen en tan gran medida el tamaño del archivo y la tasa de bits, que permiten la reproducción de música a medida que se va recibiendo. Así operan las estaciones de radio de Internet. Los oyentes se conectan y van transfiriendo el archivo a una memoria intermedia (*buffer*) de su equipo. En el caso más favorable, la música sale reproducida por un extremo de la memoria intermedia a la vez que el flujo digital ingresa por el otro. La reducida tasa de bits impuesta por el flujo digital directo resulta en una baja fidelidad, por lo cual, aunque estos archivos sí podrían quedar registrados en los discos de particulares, los sellos discográficos no ven peligro en ello. Antes bien, el flujo digital directo es un valioso medio de que los artistas independientes y los sellos hagan llegar una versión previa de sus trabajos hasta los futuros compradores.

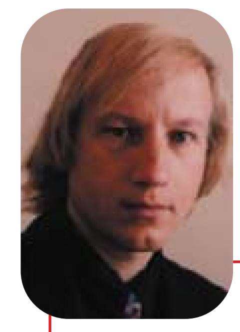
Nuevos modelos comerciales

La industria de grabación continúa perfeccionando sus soportes tradicionales. Se confía en que el formato DVD-Audio, ya próximo, se monte a la grupa del éxito espectacular del DVD-Vídeo. En el DVD-Audio se prescinde de toda reducción de datos en favor de una codificación de alta fidelidad, acompañada de sonido envolvente. Los discos DVD-Audio podrían codificarse con una frecuencia de muestreo de 192 kHz y palabras de 24 bits, y superar el rendimiento de los discos compactos. Está por ver si el oyente medio va a apreciar la superior calidad del sonido o si está dispuesto a pagar por ella. Las nuevas generaciones de lectores universales reproducen tanto los discos DVD-Vídeo como los DVD-Audio.

El disco compacto de super-audio (SACD), bastante similar, busca también una reproducción de mayor calidad y sonido envolvente. Pero falto de apoyos e incompatible con el gigantesco DVD, lo más probable es que se vea relegado a un pequeño nicho.

El DVD-Audio supone un grado más de perfeccionamiento técnico dentro de una línea evolutiva en la que las discográficas y las compañías fabricantes de equipos se encuentran cómodas. Pero parece claro que la demanda del público dicta que la industria abrace el entretenimiento digital en línea. Conforme progresa la difusión por una Internet inalámbrica y de banda ancha, el acceso a la música no hará sino aumentar, lo que obligará a la industria a buscar nuevos modelos comerciales. Entre las opciones se contarán sin duda la adquisición, el pago-por-audición y la suscripción mensual.

Por otra parte, cabe en lo posible que el acceso a la música digital sea gratuito, y que, como ocurre en la televisión ordinaria, los ingresos provengan de la publicidad o de una compañía patrocinadora. Y lo mismo que los estudios de Hollywood empezaron oponiéndose a las cintas de vídeo y ahora se benefician enormemente de ellas, resulta concebible que una explotación sagaz de la



El autor

KEN C. POHLMANN es director del programa de ingeniería musical en la Universidad de Miami y autor de *Principles of Digital Audio*, que va por su cuarta edición. En la redacción del artículo contó con la contribución de Wes Phillips.

nueva técnica pudiera permitir beneficios mayores todavía.

La técnica de distribución que dará forma a nuestro futuro está en nuestras manos ya. A lo largo de este año dará comienzo la difusión directa desde satélites hasta vehículos dotados de una pequeña antena instalada en el techo. La fusión de la telefonía móvil con Internet, con acceso inalámbrico a la Telaraña, está modificando profundamente las telecomunicaciones. Y la descarga de archivos de música digital es, en esencia, una fuerza imparable. La única amenaza que impediría hacer realidad esta promesa de su futura prosperidad es la posible falta de cooperación entre los muchos fabricantes y compañías mediáticas.

Si se materializa, podemos imaginar el día en que, mientras dormimos, nuestros agentes automatizados van explorando catálogos en Internet para encontrar música de nuestro agrado. Esa música nos acompañará sin interrupciones mientras conducimos hasta el trabajo, a menos que queramos sintonizar alguno de los 200 canales musicales enviados desde los satélites. En el trabajo nos conectaremos a estaciones gratuitas de *Redifusión* para volcar en nuestros equipos música o vídeos musicales. Por la tarde nos podremos instalar en nuestro "teatro doméstico" para disfrutar de sonido de calidad DVD y prístinas imágenes de televisión de alta definición. Después, ya de noche, con un programa similar a Napster podremos oír de matute un concierto de rock que en esos momentos se celebra en Tokio. Mientras nos deleitamos en ese placer culpable tomamos la decisión de que al día siguiente, cuando el concierto sea oficialmente emitido, vamos a reparar nuestra deuda abonando la tarifa por recibirlo.

Bibliografía complementaria

THE MP3 AND INTERNET AUDIO HANDBOOK. Bruce Fries y Martin Fries (colaborador). Team Com, 2000.

DVD DEMYSTIFIED. Jim Taylor. Segunda edición. McGraw-Hill, 2000 (disponible desde el 30 de octubre).

www.mpeg.org; www.dvdforum.org; www.sdmi.org.

INFORME ESPECIAL

Transición en el rodaje



1. LOS DIRECTORES ruedan cada vez más documentales y películas de ficción con cámaras de vídeo digitales, como la utilizada para *Paper Chasers* (*arriba*). Estas cámaras permiten un mejor acceso a situaciones imprevisibles.

Las cámaras de vídeo digitales y los equipos de edición están alterando los procesos cinematográficos e incluso la propia filmografía

Peter Broderick

La revolución digital en el rodaje de las películas ha comenzado. Nuevos instrumentos digitales —desde cámaras hasta programas informáticos de edición— están cambiando no solamente los usos cinematográficos, sino que influyen también en la decisión de las películas, de sus directores y actores. Se cuenta con la técnica necesaria. La ya impresionante calidad de las cámaras de vídeo digitales, a un precio razonable, continuará aumentando, al igual que la potencia de las herramientas de edición domésticas. El mayor nudo por cortar que queda es el sistema de distribución tradicional, incapaz de gestionar la nueva ola de rodajes digitales.

Hasta la fecha, la revolución digital se ha dejado sentir sobre todo en el sector de las creaciones independientes. Los directores independientes, al operar sin la infraestructura y la inercia de los grandes estudios de Hollywood, poseen la flexibilidad necesaria para sacar partido inmediato de las nuevas oportunidades y tienen muchos alicientes para encontrar la manera de reducir los gastos de realización.

He participado en este proceso a través de Next Wave Films, una compañía del Canal de Filmes Independientes, que proporciona a los directores independientes fondos para completar los presupuestos y otras ayudas, ya rueden digitalmente, ya en celuloide. Entre 1998 y 1999 hemos visto doblarse el porcentaje de solicitudes digitales, alcanzando más del 34 por ciento de las peticiones. Durante los seis primeros meses de 2000, el 51 por ciento de las solicitudes de fondos para completar presupuestos concernía a cintas rodadas en vídeo, y el 66 por ciento de los ítems de nuestra base de datos se habían producido en vídeo.

No es sorprendente que sean los directores con menos recursos financieros los primeros en adoptar las técnicas de producción digital. Ningún otro avance ha rebajado el coste del rodaje tan drásticamente como las cámaras digitales y los programas informáticos de postproducción para la edición y los efectos especiales. Los directores independientes pueden filmar escenas que nunca hubieran podido permitirse rodar en celuloide.

El rodaje era una de las artes más onerosas. Al revés que un poeta o un pintor, un director necesitaba recursos económicos importantes y un equipo caro. Ahora, por primera vez, pueden poseer en propiedad los medios de producción y de postproducción. Cuando los jóvenes preguntan cuánto dinero precisan para hacer una película digital, les podemos ya contestar: "Seguramente le llega con lo que tiene". Los independientes con cámaras digitales y ordenadores de sobremesa gozan de la libertad de los novelistas para ser espontáneos, improvisar, abrir nuevas vías y comenzar de nuevo.

El abanico de presupuestos de las películas digitales es muy amplio. Las esperadas "precuelas" de *La Guerra de las Galaxias* se están rodando con cámaras de alta definición y probablemente cuesten más de 100 millones de dólares. En la última película digital de Lars von Trier, *Dancer in the Dark*, se invirtieron unos 13 millones de dólares. Otros reputados directores han hecho filmes digitales en el rango de los 2 a los 8 millones de dólares, entre ellos Mike Figgis (*Time Code*), Spike Lee (*Bamboozled*) y Wayne Wang (*Center of the World*). Muchos noveles han dirigido su primera película con menos de 10.000 dólares. Incluso hay quien la ha hecho por menos de 1000. Rodada con una cámara de vídeo digital comercial y un presupuesto de 900 dólares, la película de intriga *The Last Broadcast* se encuentra en las distribuidoras de vídeos domésticos y en la programación de televisión en los Estados Unidos y en el extranjero.

En general, cuanto menor es el presupuesto mayores son las ventajas de rodar una película digitalmente. El precio del material y del procesado de la cinta constituye un porcentaje más elevado del presupuesto en las películas más baratas.

Un nuevo modelo de financiación

Los equipos digitales han transformado los modelos de financiación para la producción de películas de bajo coste. En el modelo tradicional, un escritor redacta el guión, y luego comienza la búsqueda del productor que aporte el dinero para llevarlo a la pantalla. Tras dos o tres años, los solicitantes suelen darse por vencidos si no han conseguido el dinero. Si hallan productora, probablemente tengan que ceder a cambio una parte sustancial del control del desarrollo de la película. Lo que implica a menudo otorgarle la última palabra sobre el guión, los actores y, a la postre, la propia película.

En el nuevo modelo de la cinematografía digital, los directores llevan a cabo una evaluación sensata de los recursos antes de escribir el guión: determinan de cuánto dinero disponen, qué equipo pueden usar y qué reparto y personal van a reunir. Preparan entonces un guión materializable sin salirse de los recursos disponibles. Este enfoque permite que el director concentre su atención y tiempo en la película, no en la búsqueda de dinero.

La idea de realizar películas con los recursos disponibles fue crucial para la ola de obras con presupuesto mínimo que comenzó a prin-



2. CON UNA LIGERA cámara digital de vídeo los operadores ruedan desde cualquier sitio sin grandes preparativos. A la izquierda, Don Cheadle encesta en *Manic*.

Cámara de vídeo digital

Las cámaras de vídeo digitales registran las imágenes en circuitos integrados de silicio, que sustituye al carrete de celuloide de 16 o 35 milímetros empleado en las cámaras de cine tradicionales (*véase la página precedente*). Podemos conectar la cámara al ordenador con un cable IEEE 1394, pasar los datos al disco duro del ordenador y editar entonces las imágenes sin degradación alguna de calidad. La película acabada se transfiere a celuloide para exhibirla mediante un proyector de cine comercial. Cuando los proyectores digitales gocen de una mayor difusión, los datos se enviarán a las salas de proyección por satélite o por cables de fibra óptica.



cipios de los noventa. Registradas en celuloide antes de la aparición del vídeo digital, algunas películas de presupuesto escaso sacaban el máximo partido de los recursos disponibles: *El Mariachi* (Robert Rodríguez tenía acceso a un perro y a un autobús de transporte escolar, que desempeñan en la cinta un papel destacado), *Clerks* (Kevin Smith la ambientó y rodó en el almacén donde había trabajado) y *The Brothers McMullen* (Edward Burns rodó la mayor parte del film en la casa de sus padres, donde su madre cocinaba para los actores y el personal). Estas películas animaron a directores de Estados Unidos y del extranjero a hacer películas con menos de 100.000 dólares, sin tener que pasarse años tratando de reunir millones. La aparición de instrumentos digitales aceleró la reducción de los presupuestos de las primeras películas disminuyendo drásticamente la financiación requerida. Estas nuevas herramientas también proporcionan a los directores la ocasión de ser más creativos.

Nuevas opciones creativas en el escenario digital

En el plató, la cámara sólo filma durante una pequeña fracción del tiempo, por lo caro que resulta el material y el procesado, así como por el tiempo que se requiere para iluminar y montar cada escena. En un plató digital, la cámara graba durante un porcentaje de tiempo mucho mayor. Los directores usan con frecuencia dos cámaras, algo fuera de su alcance en la mayoría de los rodajes de celuloide. Y como la realización de vídeo digital

Cámara de cine

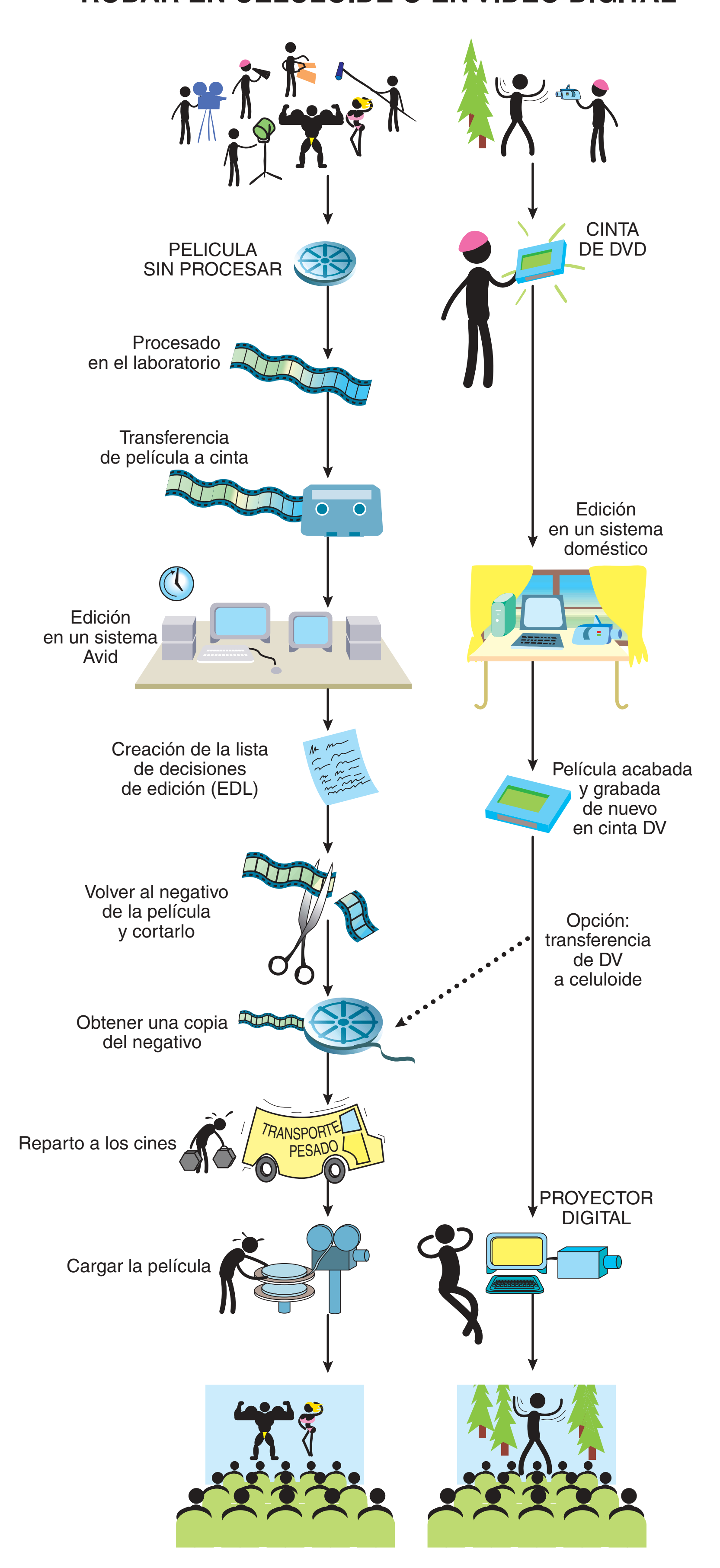
PELICULA DE ACETATO
NEGATIVO DE LA PELICULA
Película procesada
TELECINE
Transferencia de película a cinta
GRABADOR DE VIDEO
CINTA DE VIDEO
AVID
Negativo cortado según la lista de decisiones de edición (LDE) de Avid
Obtención de las copias para proyección
PROYECTOR DE CINE
TRANSPORTE TERRESTRE

Las cámaras de cine tradicionales registran 24 imágenes por segundo en una película de acetato que tiene tres capas de emulsión de haluro de plata sensibles al rojo, al verde y al azul. Una vez expuesta y procesada la película, una máquina de telecine transfiere el negativo a una cinta de vídeo. A continuación, la información (imagen y sonido) de la cinta pasa a un sistema informático no lineal de edición, por lo general un Avid. La película se edita digitalmente en este sistema, de lo cual se obtiene una lista de decisiones de edición (LDE) que indica exactamente qué fragmentos del negativo original se utilizarán y en qué orden. Siguiendo esas instrucciones se corta el negativo. Las copias para proyección se obtienen del negativo final y se distribuyen a las salas comerciales.

acostumbra requerir un acceso directo al personal y a los equipos, las decisiones estéticas que se toman suelen redundar en una iluminación más simple y breve.

En algunas películas de ínfimo presupuesto rodadas en celuloide, la relación entre el metraje rodado y el metraje empleado en la copia final llega a ser de sólo 3:1. En películas digitales equiparables, la relación de metraje puede ser de 50:1. Esto permite trabajar con los actores de un modo impensable en el celuloide. Los directores pueden filmar ensayos, grabando los momentos inspirados que de otra manera se perderían. En vez de filmar sólo unas cuantas tomas de una escena, pueden rodarse cuantas tomas se necesiten para alcanzar el mejor nivel de representación. En un escenario digital, el actor no se pasa horas de brazos cruzados entre escena y escena esperando que aparejen los focos. Cabe experimentar durante la propia ejecución de la obra. La reproducción digital, por ejemplo, permite examinar lo que ha sido rodado en el plató inmediatamente (en vez de esperar uno o dos días para ver las pruebas). El director puede probar muchas variaciones sobre una escena y ver la grabación en vídeo para decidir qué es lo que merece la pena.

Gracias a las cámaras digitales se saca partido del mundo real. Con una cámara mediana y pocos operarios, podemos rodar una historia de ficción en un escenario real. Michael Rehfield, director y protagonista de *Big Monday*, hizo su primera película en las calles y el metro de Nueva York. A diferencia de las películas de estudio rodadas en el mismo Man-



hattan, con extras cuidadosamente orquestados en escenarios muy preparados, *Big Monday* incorporaba la vida de la calle real en el tiraje, lo que le confiere la frescura genuina del documental.

Paul Wagner utilizó una pequeña cámara digital para rodar escenas claves en el Tíbet para *Windhorse*, sumamente crítica con la ocupación china de ese país. Las autoridades nunca hubieran dejado que tal película se rodara allí, pero tomaron a los cineastas por turistas que grababan un vídeo doméstico.

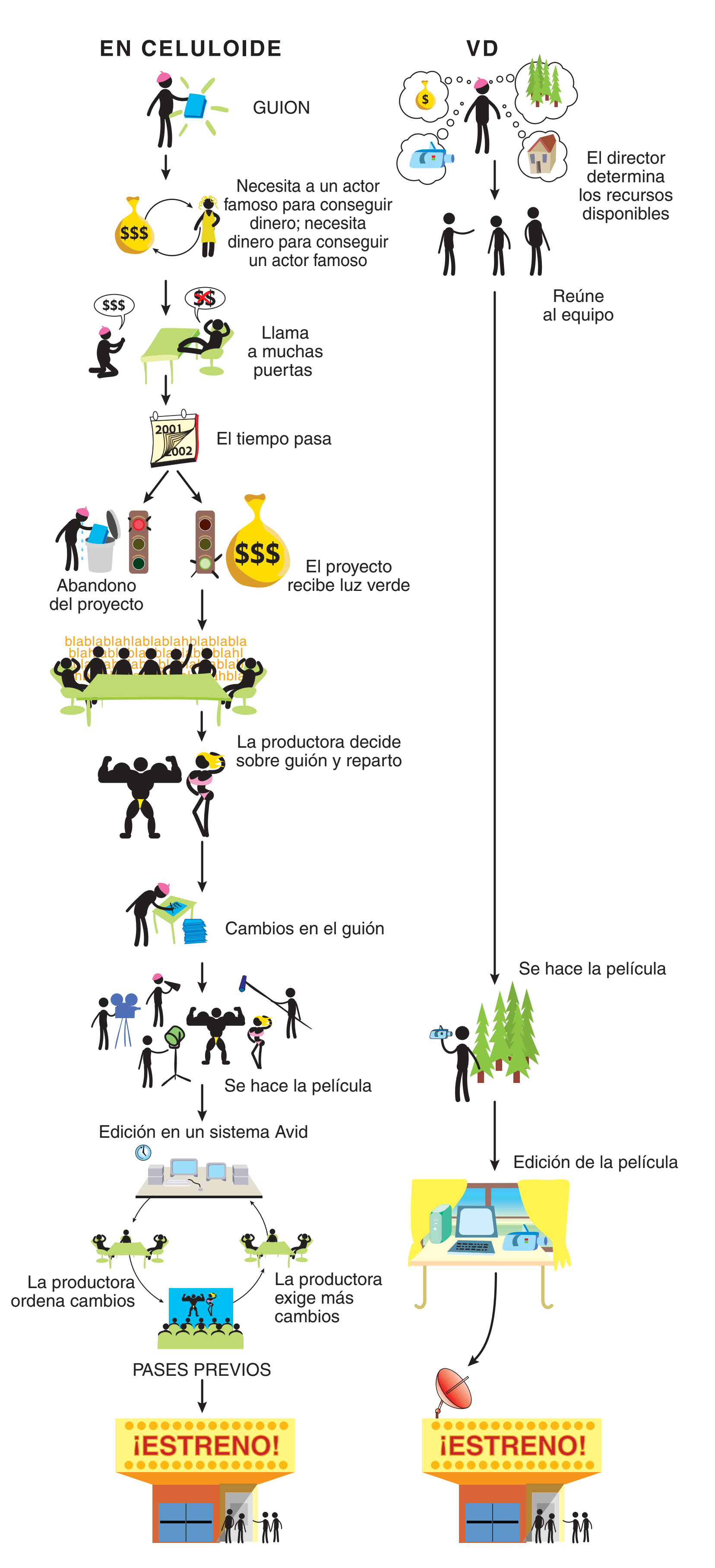
Las herramientas digitales les han permitido a los directores transformar el proceso de realización. No necesitan ya rodar una película de corrido. Pueden rodar y editar, escribir nuevas escenas y seguir rodando. Por primera vez, los directores independientes pueden "gastar tiempo". Así, la película evoluciona de una forma orgánica (se desecha el material menos bueno para trabajar sobre el mejor). Con una cámara digital y poco personal, incluso con actores aficionados, puede sacarse partido de factores imponderables del mismo modo que se hace en los documentales. Al preguntarle a cierto director cuándo pensaba terminar el rodaje de su película digital, me contestó: "Pues si llueve, esta noche".

Además, la cinematografía digital suprime el elevado coste de la creación de efectos ópticos. La capacidad para crear efectos especiales, espectaculares y sutiles, en los ordenadores de sobremesa avanza a pasos agigantados y ensanchando los límites. Next Wave Films recibió una película de ciencia-ficción de presupuesto bajísimo con efectos especiales asombrosos que probablemente hubieran costado al menos 1 o 2 millones de dólares si los hubieran encargado a una compañía del sector.

Los realizadores digitales también pueden evitar o posponer otro de los mayores desembolsos de la cinematografía tradicional: la copia. Pueden proyectar su película digitalmente hasta que encuentren un distribuidor que desee financiar la transferencia al celuloide para distribuirla en las salas comerciales. Si no logra la distribución a los cines, tampoco tendrá que abonar su traslado a celuloide, porque el vídeo original ya sería suficiente para difundirla por cable y televisión, y también por satélite, vídeo doméstico e Internet.

Entusiasmo independiente, reserva de las productoras

Aunque el cine digital ha cobrado un auge especial en el sector independiente, el cambio ha sido mucho más lento en el ámbito de las productoras. No debe sorprendernos. George Lucas se ha distinguido por su labor en pro de que los estudios tradicionales consideren seriamente la utilización de herramientas digitales. Su compañía de efectos especiales, Industrial Light & Magic, ha abierto camino con muchos adelantos y continúa rompiendo moldes en la magia de las películas. En la primavera de 1999 Lucas aceleró la lle-



El estudio de sobremesa

Al alcance de cualquiera está ahora tratar de emular a Scorsese en su mesa de trabajo. Por menos de 2500 dólares se puede comprar un estudio de sobremesa equipado para realizar cuantas películas se quiera. El estudio digital básico para un principiante consta de:

Cámara DV (Vídeo Digital). Las cámaras de alta calidad empiezan a partir de los 800 dólares que cuesta una MiniDV de 1 circuito integrado o una cámara portátil Digital 8. (*Siguiente paso*: una Sony PD-150 de 3 circuitos integrados, por 3700 dólares)

Ordenador de sobremesa. El Apple iMacDV Edición Especial viene con un monitor, 128 MB de RAM, un disco duro de 30 GB (suficiente para almacenar más de dos horas de material en DV), puertos FireWire (que permiten trasladar directamente de la cámara digital al ordenador el vídeo y el sonido digital sin merma de calidad) y el programa gratuito iMovie 2 (un programa de edición no lineal fácil de usar): 1500 dólares. (*Siguiente paso*: Apple G4/450 MHz con todas las opciones del programa de edición Final Cut Pro y el programa de efectos especiales Adobe After Effects, e incluyendo dos monitores de 19 pulgadas; sobre unos 7000 dólares)

Rodaje en celuloide y en vídeo

Las diferencias de precio entre rodar en vídeo y en celuloide son significativas. El siguiente detalle compara el coste promedio de rodar y preparar para la edición una hora de película de 35 mm frente al de una hora de DV.

Rodaje en 35 mm, edición en vídeo (precio en dólares)

Película (800 metros de película nueva Kodak 5274 a [illegible]728 dólares el metro)	$3110,40
Procesado (0,345 dólares por metro)	62[illegible]
Preparación para el telecine	6[illegible]
Telecine (a 200 dólares la hora, razón de 5 incluyendo la cinta empleada)	[illegible]
Cinta (una hora de BetaSP & 3/4 de pulgada)	73,2[illegible]
Precio total	$4864,60

Rodaje en MiniDV, edición en vídeo

Cinta (el original de la cámara)	$1[illegible]
Cinta (copia)	[illegible],00
Precio total	$20,00

gada del cine digital insistiendo en que *La Amenaza Fantasma* se proyectara electrónicamente en algunas salas.

También ha sido el catalizador para acelerar la difusión de obras digitales de elevado presupuesto. Al anunciar que la segunda y tercera entregas de la nueva trilogía de "La Guerra de las Galaxias" se rodará con cámaras de alta definición, mostró su convicción de que podían realizarse digitalmente películas de 100 millones de

dólares. Su compromiso espoleó a Sony y Panavision para que desarrollaran conjuntamente nuevas cámaras digitales de alta definición. Aparte de tener más o menos el doble de definición que el vídeo tradicional, estas cámaras ofrecen 24 imágenes de barrido progresivo por segundo. Ideales para registrar tomas destinadas a ser transferidas al celuloide, que corre a 24 fotogramas por segundo, estas cámaras evitan muchos de los efectos indeseados que pueden obstaculizar las transferencias de vídeo a celuloide.

Time Code fue la primera película de acción digital financiada y estrenada por una afamada productora. Su sólida calidad visual y la favorable acogida de la crítica pueden abrir las mentes de los ejecutivos de los grandes estudios hacia la cinematografía digital.

Pero es demasiado pronto para enterrar al celuloide. Cientos de millones de espectadores de los cuatro puntos cardinales han crecido con él. El reciente éxito de películas rodadas en Imax demuestra el importante papel que puede desempeñar la calidad de imagen del celuloide. Hollywood no quiere arriesgar sus relaciones con su audiencia global. Aun cuando el vídeo doméstico sea más lucrativo, la distribución en las salas comerciales es la locomotora que mueve el tren de los ingresos.

Las productoras serán muy cautelosas en su empleo de herramientas de producción digital. Mientras los ejecutivos no tengan la confianza de que se puede rodar digitalmente y acabar por obtener en los cines la sensación equivalente a una película (ya sea con copias de 35 milímetros o por proyección digital), procederán con sumo tiento. Algunas obras serán híbridas, mezclando el celuloide y el vídeo digital. Otras usarán el vídeo digital para conseguir aspectos distintivos que no emulan al celuloide en modo alguno.

La distribución y las herramientas digitales

A medida que se vaya multiplicando el número de películas digitales, crecerá la oferta de filmes excepcionales que no puedan pasarse en los cines porque las salas tradicionales seguirán consagradas a los productos de Hollywood. Los independientes deben, pues, aprovechar las oportunidades para explorar nuevas rutas que lleguen a los espectadores. No será fácil, porque los cancerberos que controlan el acceso a las redes de distribución tradicionales lucharán por conservar su dominio del mercado. Pero los independientes tienen varias cosas a su favor. El público mira con atención creciente a los cineastas independientes, gracias a una mayor cobertura en la prensa, festivales cinematográficos y exhibiciones por cable. E Internet.

Cualquiera que tenga acceso a Internet puede comprar ahora una película en la Red y recibir por correo la cinta de vídeo o el DVD. Los independientes, desde Kevin Smith (*Clerks*, *Chasing Amy*) hasta el equipo que hizo *El proyecto de la bruja de Blair*, han demostrado la capacidad de Internet para despertar el interés por las películas que se proyectan en los cines. Estas técnicas se modificarán para comercializar películas digitales que no se proyecten en los cines a espectadores potenciales de todo un país y del mundo entero. Con el tiempo, una vez que el ancho de banda se haya incrementado sustancialmente, las películas se distribuirán por la Red. Los espectadores con acceso a la Red de alta velocidad y conexiones que enlacen sus ordenadores con los televisores podrán ver estas películas en casa con una razonable calidad de imagen y sonido.

Los independientes intentarán abrir nuevos canales de distribución utilizando la Red a la par que otras vías digitales. Los sistemas de proyección digital, que ya han creado nuevas oportunidades en los festivales de cine, permitirán el desarrollo de una red de microcines. En los cafés, museos, locales comunitarios y centros comerciales se emplearán proyectores digitales más asequibles y de fácil transporte.

Si los independientes no crean nuevos mecanismos de distribución, podrían quedar marginados. Aunque rodar películas les será más fácil que en la época del analógico, resultará más difícil que esas películas se proyecten en los cines. Pero si pueden abrir nuevos canales de distribución, la diversidad y la calidad de las películas a las que podrán acceder los espectadores crecerá vertiginosamente. La revolución digital en la ejecución podría marcar el comienzo de un renacimiento digital en la distribución.



El autor

PETER BRODERICK preside Next Wave Films, productora de películas digitales. Ha impartido cursos sobre producción independiente en la Universidad de California en Los Angeles y ha pronunciado conferencias sobre el rodaje digital en Cannes, Sundance, Toronto y otros festivales de cine. Mark Stolaroff y Tara Veneruso han colaborado estrechamente con Broderick en la redacción de este artículo.

Bibliografía complementaria

LIBROS

THE IFILM DV FILMMAKER'S HANDBOOK. Maxie Collier. Son #1 Media, 1998. Disponible en www.dvfilmmaker.com.

DIGITAL MOVIEMAKING. Scott Billups. Michael Wiese Productions, 2000. Disponible en www.mwp.com/pages/booksdigitalmovie.html

REVISTAS

DV. En la Red en www.dv.com

RES. En la Red en www.resmag.com

Videography. En la Red en www.videography.com

PÁGINAS WEB

www.2-pop.com

www.nextwavefilms.com

El cine digital y sus posibilidades

La proyección digital funciona, pero no ha llegado todavía a las salas comerciales

Peter D. Lubell

Desde que George Lucas estrenó su primera película, *La Guerra de las Galaxias*, hace 24 años, ha ido a la cabeza en la aplicación de la técnica al cine. Su obra más reciente, *Episodio I: La Amenaza Fantasma*, contiene casi 2000 tomas de efectos digitales. Mas Lucas llevó la digitalización de *La Amenaza Fantasma* un paso más allá. Algunos de los pases previos, en verano de 1999, fueron proyectados digitalmente. Los espectadores quedaron asombrados por el excelente sonido y la claridad y el brillo de las imágenes. Los proyectores digitales funcionaron bien, pero la técnica debe bajar de precio antes de que esta reproducción perfeccionada de sonido e imagen llegue al gran público.

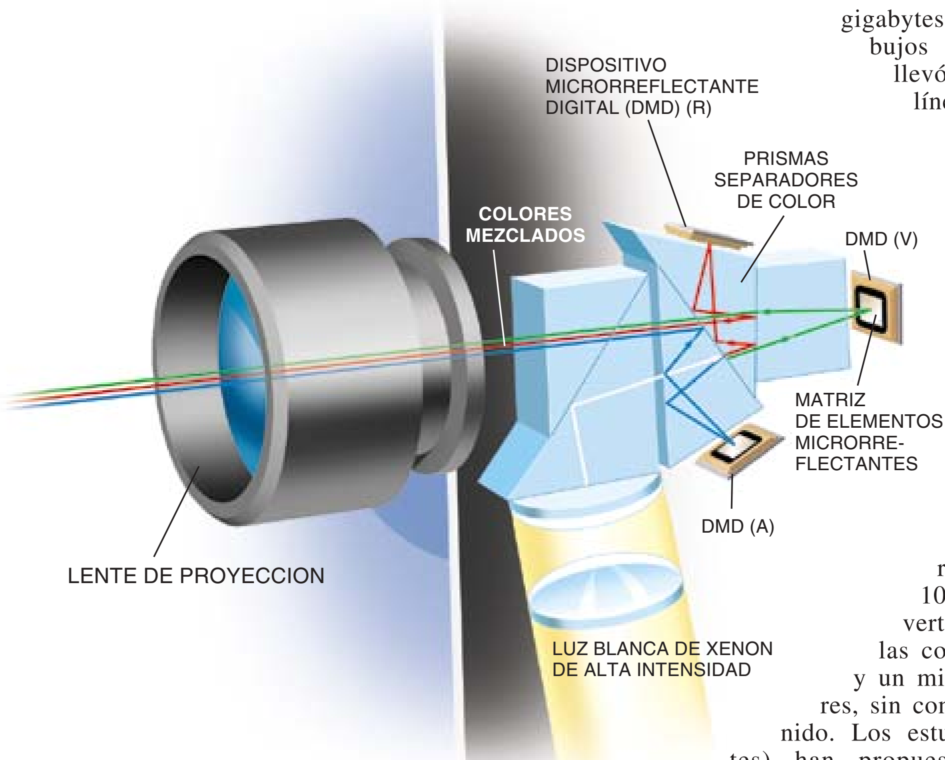
Para las películas proyectadas a la manera tradicional, se realizan varias copias en negativo de una impresión patrón en positivo de la cinta editada. Los negativos dan lugar a los miles de impresiones en positivo que se distribuyen a las salas de proyección.

El cine digital comienza también con una impresión patrón. Cada fotograma se registra electrónicamente y se pasa a formato digital; el producto final editado es un archivo de datos de tamaño mayúsculo, unos 1000 gigabytes en promedio. (Si la película se filma digitalmente, sobra el paso de digitalización.) Lo ideal sería que el archivo, una vez comprimido, se enviara electrónicamente a los cines por un canal de distribución de banda ancha (sea por cables de fibra óptica, sea por transmisión vía satélite). En los pases previos de 1999, los discos duros se transportaron físicamente a los cines de prueba. En demostraciones posteriores de películas de Disney, de menor resolución, se utilizó como medio de almacenamiento portátil el videodisco digital (DVD).

En los ensayos de 1999 se emplearon dos técnicas de proyección rivales, una de Hughes-JVC Technology y otra de la división DLP de Texas Instruments. El sistema DLP, que tuvo menos problemas técnicos, parece que avanza más deprisa. Disney escogió la técnica DLP para el lanzamiento digital de *Tarzán*, *Toy Story 2* y *Misión a Marte* en 12 localidades norteamericanas y muchas otras extranjeras a finales de 1999.

El proyector digital utiliza el sistema tricromático rojo-verde-azul (RVA) introducido por Thomas Young en 1801, que es la base tanto de la fotografía en color como de la televisión. Todas las imágenes en color que observa el ojo humano están compuestas de esos tres colores.

El proyector DLP emplea tres dispositivos microrreflectantes digitales (DMD), uno para cada color: rojo, verde y azul. Unos prismas descomponen la luz blanca de alta energía que proporciona una fuente de xenón blanca de elevada intensidad (5000 watt) en los tres colores, y mandan cada uno al DMD correspondiente. Cada DMD es una matriz de 1280 por 1024 espejos controlados digitalmente (¡un total de 3.932.160 espejos!). Cada espejo refleja una intensidad de color variable, de acuerdo con lo que se indique en el archivo de datos, para proyectar la componente de una imagen.



Los proyectores digitales de Texas Instruments envían la luz a unos prismas que dirigen las longitudes de onda roja (R), verde (V) y azul (A) al dispositivo microrreflectante digital (DMD). Al mismo tiempo, la información pixelada del archivo de la película se transmite fotograma a fotograma a los DMD. El DMD cabe en la palma de la mano, y sus diminutos espejos, de 16 micras cuadradas cada uno, giran independientemente sobre unos goznes micromecánicos, siguiendo las instrucciones digitales. Las componentes reflejadas se entremezclan antes de alcanzar la lente de proyección.

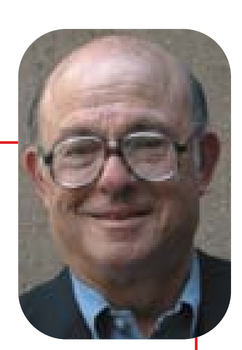
El proyector digital cabe en la misma carcasa que un proyector normal de 35 milímetros y puede proporcionar la misma resolución. Los proyectores digitales de 1999 alcanzaban resoluciones cercanas a las 2000 líneas horizontales, con relaciones de contraste (de blanco a negro) de 1000:1, lo que les equipara con las copias actuales de 35 milímetros. Sin embargo, aún le queda al cine digital un largo camino por recorrer antes de satisfacer las especificaciones de las copias de 70 milímetros empleadas en las películas taquilleras de elevado presupuesto, tales como *La Amenaza Fantasma* (típicamente 3000 líneas y relaciones de 1200:1).

Pero el cine digital también es prometedor desde el punto de vista financiero. La llamada distribución de saturación en los Estados Unidos requiere actualmente unas 5000 copias a 2000 dólares cada una, lo que representa un total de 10 millones de dólares, sin contar los gastos de transporte y de logística para repartirlas en el momento preciso. Las copias se pueden emplear en unas 30 sesiones; luego han de reemplazarse. Por el contrario, los 19 discos rígidos, cada uno de 18 gigabytes, empleados para almacenar la copia patrón de *La Amenaza Fantasma*, costaron unos 260.000 dólares y durarán indefinidamente, aparte de que se pueden hacer copias baratas, si se dispone de suficiente memoria.

La distribución digital vía satélite o a través de las líneas de fibra óptica ofrecería ventajas en la expedición, entre ellas el reparto simultáneo a las salas comerciales. Cisco Systems y 20th Century Fox demostraron la posibilidad de la transferencia electrónica por Internet. Descargar el archivo comprimido de 42 gigabytes de la película de dibujos animados *Titan A.E.* llevó unas dos horas por línea de alta velocidad.

Pero estos beneficios se derraman principalmente sobre los estudios cinematográficos. Los proyectores digitales cuestan 250.000 dólares cada uno, mucho más que los 50.000 que vale un proyector comercial. Los cines tendrían que cargar con sustanciales gastos de reconversión. Aun cuando los proyectores digitales bajaran a 100.000 dólares, reconvertir un cine con 10 salas costaría entre un millón y un millón y medio de dólares, sin contar los ajustes del sonido. Los estudios (y los fabricantes) han propuesto varios esquemas monetarios para prorratear los gastos, tales como préstamos sin interés para los equipos o una tarifa de precios diferente para las plateas digitales y las tradicionales. Ninguno de ellos ha sido calurosamente aceptado por los propietarios de las salas, que ven cómo una técnica cara está intentando introducirse en su negocio.

Los proyectores digitales irán mejorando. Su utilización no es una cuestión de prestaciones técnicas, sino empresarial. Los propietarios de los cines deben encontrar en la distribución y proyección digital un atractivo tanto artístico como financiero. El cine digital tendrá que esperar unos años hasta que eso ocurra. Incluso George Lucas, que está filmando *Episodio II* con cintas digitales de Sony y editando las copias digitalmente, prevé exhibir el producto final a la usanza tradicional: proyectando una cinta de celuloide.



El autor

PETER D. LUBELL, profesor de la Universidad Politécnica de Nueva York, es consultor de telecomunicaciones de Communications Strategies en Alberston.

Bibliografía complementaria

MAKING DIGITAL CINEMA ACTUALLY HAPPEN - WHAT IT TAKES AND WHO'S GOING TO DO IT. Steven A. Morley, en *140th Annual SMPTE Technical Conference Proceedings*, Pasadena (California), páginas 448-462; octubre de 1998.

Humanos



s virtuales

Se han creado digitalmente personajes, escenas y películas enteras. Pero, ¿pueden forjarse dobles del hombre informáticos que protagonicen de forma verosímil películas hechas con ordenador?

Alvy Ray Smith

Cuando Richard Dreyfuss, la estrella de cine, presentó el óscar técnico que se nos concedió a mis compañeros y a mí hace varios años, se nos quedó mirando con una sonrisa sardónica y nos dijo: "Somos indispensables los unos para los otros. No lo olvidéis los que habéis hecho *Toy Story*. Vamos a entrar todos juntos en el siglo XXI... ¡o eso espero!" Los actores que había entre el público se rieron, algunos nerviosamente.

El miedo apenas disimulado nacía de que algún día actores virtuales, como los de *Toy Story,* aunque con una apariencia más humana, reemplacen a los de verdad y caminen, hablen, gesticulen, piensen y se emocionen igual que un humano de carne y hueso. Y, además, sin cobrar. Pero Hollywood puede dormir tranquilo. En el mundo del espectáculo digital los actores no desaparecerán. Al menos, por ahora. Otra cosa es la función que se les reserve en las películas realizadas por ordenador, de principio a fin.

Toy Story, estrenada en 1995, abrió el camino. No hubo que rodar escenas reales. Vinieron después *Antz (Hormigaz)*, *Bichos* y *Toy Story 2*. Menos *Antz*, realizada por Pacific Data Images, las otras son obra de Pixar Animation. Estas películas, por fascinantes que resulten, parecen todavía unos dibujos animados, maravillosos, tridimensionales, sugeridores de un mundo "real", pero dibujos animados a la postre. Lo que se sueña es en crear un Richard Dreyfuss o una Julia Roberts digitales y verosímiles.

Para creer que llegará el día en que logre un personaje humano convincente sin que lo interprete un actor, hay que sumergirse en las procelosas sectas informáticas de la inteligencia artificial, la realidad virtual y la vida artificial. De la "construcción" digital de todo. Mejor será, sin embargo, distinguir entre el arte de actuar y la representación por medio de actores. En el futuro previsible se necesitarán actores para dotar a los personajes —los interpreten humanos o sus sosias informáticos (los llamados *avatares*)— de acciones, expresiones, voces y pensamientos creíbles.

Los mundos donde transcurren las interpretaciones de los actores son cada vez más digitales y su verosimilitud mejora por momentos. La película *Titanic* contó, con imágenes tridimensionales generadas por ordenador, una historia imposible de narrar en una pantalla sin ese truco. Gracias a los ordenadores se pudo ver a montones de personas cayendo por la borda de un inmenso transatlántico que se hunde y hacerlo de una manera que habría sido demasiado peligroso, caro o complicado reproducir en un océano real, en un tanque de agua en un estudio o con miniaturas. Los técnicos de Industrial Light & Magic crearon para *La tormenta perfecta* tempestuosas olas de 30 metros de alto que no podrían haberse filmado en aguas reales, ni simularse de otra manera.

Pero las adolescentes a las que *Titanic* debió su enorme éxito no acudían a los cines por las imágenes de ordenador. Les seducía la humanidad de los personajes. A veces se crean efectos especiales con ordenador por puro placer, que gozan del favor del público. En respuesta lógica la industria cinematográfica va a donde esté el dinero. Mas cuando la técnica madure volveremos a lo fundamental, a una buena historia con buenos personajes, y los ordenadores se utilizarán de manera tan refinada que el público no se percatará de ello.

¿Hasta dónde puede llegar la simulación informática? ¿Es posible crear sosias virtuales que resulten verosímiles en una pantalla? Para construir la simulación de arriba abajo de una persona hay que solucionar problemas impresionantes: hay que dotarla de conciencia, emociones (si es que una cosa y la otra van por separado, como se pregunta Antonio Damasio), matices físicos y sutileza interpretativa, por no hablar del problema filosófico de las propiedades de las cosas (¿cómo sabe un personaje en qué consiste la "azulidad"?). Puede que un día hagamos una Marilyn Monroe artificial (el ejemplo habitual); al fin y al cabo fue una máquina biológica que en última instancia cabría explicar físicamente, al menos con una precisión muchísimo mayor de lo que hoy es

1. Sebastian Caine, quizás el sosias digital más verosímil del hombre hasta la fecha. Sony Pictures Imageworks lo creó para *El hombre sin sombra*; este modelo del actor Kevin Bacon se construyó adhiriendo músculos virtuales a huesos, añadiendo ojos, piel y vasos sanguíneos y controlando delicados movimientos articulares.



2. Las feroces olas que se tragan al actor Mark Wahlberg en *La tormenta perfecta* fueron simuladas por Industrial Light & Magic, que recurrió a la dinámica de fluidos computacional para las olas y la turbulencia, a la dinámica de partículas fundada en reglas para los rizos del agua, la espuma y las rociadas, y a gradientes de luz basados en fractales para añadir texturas a las superficies e incluso dispersar la luz dentro de las gotas de agua.

posible. Pero sigue siendo cosa de fe aceptar que se pueda llegar a saber tanto. Nadie es capaz de predecir si existirá alguna vez la actriz virtual, si sería más barata, si serviría para más cosas que una de verdad. Es posible que tropecemos con un obstáculo lógico fundamental, como les pasó a los matemáticos con el teorema de incompletitud de Gödel.

Kevin Bacon y su sosias

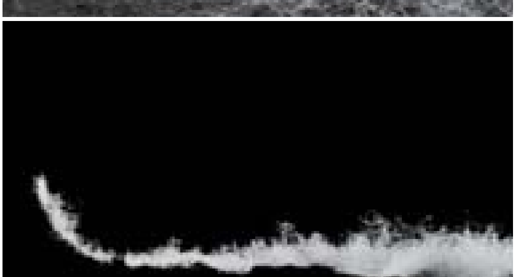
En vez de fantasear sobre la construcción de una naturaleza humana o de perorar sobre el dominio mundial de las máquinas, hablaré de lo que razonablemente cabe esperar que consigamos de aquí a ochenta años: una integración de lo mejor de ambos mundos, el humano y el mecánico, el artístico y el técnico.

En los filmes normales, la cámara toma a los actores en kilómetros de película, que se montan después y convierten en los rollos que se proyectan al ritmo de 24 fotogramas por segundo en las salas de exhibición. En la animación sobre celuloide tradicional, la de clásicos como *Fantasía* o *Pinocho*, los animadores dibujan personajes con lápiz sobre papel cada tres fotogramas, más o menos. Otros artistas se encargan de los fotogramas intermedios. Se hace cada dibujo con tinta sobre una hoja de celuloide limpio, o "cel"; con pinturas de color opacas se da acabado a los perfiles. Mientras, un artista pinta un fondo, con cierto detalle si debe servir para muchos fotogramas. Los celuloides de los personajes en tinta y el fondo se superponen de manera que casen; de cada una de esas combinaciones, la cámara de cine toma un solo fotograma. La cámara pasa al fotograma siguiente. El proceso se repite miles de veces.

La moderna animación digital en celuloide nació en 1990 con el sistema Pixar que la Disney utilizó en *Los rescatadores en Cangurolandia*. Gracias al mismo abarrotaría más tarde los cines con *El rey León*. Los artistas se encargan en esta técnica de los dibujos a lápiz y de los rellenos intermedios, como antes, pero los demás pasos se llevan a cabo con ordenadores. La filmación se hace con cámaras controladas por ordenador. Con todo, la mayor ventaja estriba en la digitalización de la logística. Este aspecto de la realización de las películas de animación —seguir el paso de los cientos de miles de elementos en los varios estadios que llevan a su conclusión— constituye un verdadero salto adelante que ahorra tiempo y esfuerzo.

La animación digital sobre celuloide da todavía una impresión bidimensional. La animación con plastilina es un intento de sugerir un mundo de tres dimensiones; se ha recurrido a ella en *Evasión en la granja*. Se modelan con plastilina los elementos de cada fotograma y el animador tiene que mover, digamos, la pata de una gallina un centímetro por fotograma para provocar la sensación de que anda.

Pero la animación con plastilina no se parecerá nunca a la vida real. Un modelo de plastilina será siempre un modelo de plastilina. La animación por medio de imágenes tridimensionales generadas por ordenador (o animación 3-D) se propone fabricar un mundo verosímil sin tener que filmar dibujos, modelos ni actores reales. Unos programas especiales moldean, con elementos geométricos, fondo, personajes y objetos, así como sus sombreados, iluminaciones y movimientos, con el emborronamiento causado por éstos. Envolver una superficie con una imagen produce objetos complejos, con una textura. Todos los per-




3. El impacto frontal del recuadro inferior se elaboró mediante la superposición de imágenes generadas por ordenador. De arriba abajo: un *Andrea Gail* virtual, el océano creado por el ordenador, una cresta espumosa lateral simulada, la embestida de la proa contra la ola que viene y la iluminación de las lámparas colgadas del aparejo.

sonajes, decorados, estancias y efectos visuales, así como el sonido de ambiente y los efectos sonoros, se llevan a cabo digitalmente, y también el montaje y mezcla de los componentes. Por ahora, personas reales graban diálogos y música, pero también esto podría hacerse con potentes chips de ordenador. Los fotogramas se guardan en un disco duro. No se transfieren a cinta hasta que no está todo terminado. En las salas de proyección digital, el operador se limita a bajar el fichero de la película vía satélite o a poner un videodisco digital.

Para crear una persona virtual en una película realizada por ordenador (sin cámara), los animadores construyen un esqueleto, lo cubren con músculos y piel y hacen que remede el movimiento real de un cuerpo. El empeño más ambicioso realizado hasta la fecha se concretó en *El hombre sin sombra*, donde sale un Kevin Bacon completamente digital.

Pese al resultado notable obtenido, quizá pasen veinte años antes de que pueda crearse un Kevin Bacon verosímil sin tener que filmar al actor real, aunque sólo sea como modelo de su yo virtual. Para generar algunos de los efectos especiales de la película, Bacon se vistió una malla verde a fin de que los animadores filmasen sus movimientos y los transfiriesen al modelo informático. Más importante aún es que interpretase al protagonista de *El hombre sin sombra*. En esa experiencia quedan compendiados los papeles probables de actor y animador, de hombre y de máquina, en las películas realizadas por ordenador: actores reales guiando representaciones realistas de seres humanos, de sí mismo quizá.

Se ha comprobado ya que pueden fundirse las capacidades interpretativas de animadores y actores. Tom Hanks no se limita a ponerle la voz a Woody, el vaquero de *Toy Story* y de *Toy Story 2*. Este parece actuar en diversas situaciones como Tom Hanks lo haría. Hanks "entraba en el personaje" cuando leía las líneas de diálogo de Woody: sorprendido, abría los ojos como platos; decepcionado, se le hundían los hombros. Pixcar tomó en vídeo a Hanks durante aquellas sesiones y los animadores se basaron en esas indicaciones visuales al dar vida a Woody. En cierta medida Woody se convirtió en un sosias de Tom Hanks, aunque sin perder su propia personalidad que los animadores le habían infundido. Porque un animador es un tipo especial de actor de talento que puede hacer que creamos que un montón de polígonos coloreados tiene corazón, se enfada y es más listo que el coyote.

Un actor, sobre el escenario o en la pantalla, es un animador de su propio ser. Nos hace creer que el cuerpo, la voz y la mente que vemos son los de una persona enteramente diferente; en el caso de Hanks, lo mismo el astronauta del *Apolo 13*, Jim Lovell, que el patoso Forrest Gump.

Cualquiera que se haya entretenido con videojuegos de grupo en la red, se habrá representado a sí mismo a través de un personaje gráfico, un *avatar*. La calidad de estos sosias se resiente de las penurias de ancho de banda de Internet y las limitaciones de los microprocesadores, pero lo cierto es que ya es corriente que los seres humanos den vida a manifestaciones de sí mismos. En cuanto a las películas sin cámara, imaginemos un actor que dé vida a un avatar de primera calidad. Un Kevin Bacon dando vida a una representación





4. Desarrollo de una escena de *Toy Story 2* que incluye (*de izquierda a derecha*) el boceto a lápiz original de la escena; una realización esquemática por ordenador de los personajes, en forma de perfiles o armazones de alambre; una ejecución de prueba con polígonos coloreados, por lo normal pequeños triángulos y cuadriláteros (*que no se ven*); y la ejecución final con resolución apropiada para una pantalla de cine, con la iluminación completa de texturas y patrones.

realista de Kevin Bacon. Pero, ¿por qué vamos a molestarnos en ello? Porque el Kevin Bacon nacido de un ordenador puede tirarse al mar desde un acantilado en Acapulco, o desde una neurona a su propio cerebro, sin romperse los huesos ni tener que jibarizarse.

80 millones de polígonos

Hay, pues, actores, los animadores, que dan vida a representaciones bastante creíbles de seres humanos. Les falta, empero, realismo. No es poca cosa. ¿Pueden adquirirlo?

La ley de Moore resume la dinámica de la revolución digital. Suele aplicarse al crecimiento exponencial de la densidad de los transistores en un circuito integrado. Yo la expresaría en otros términos: todo lo bueno de los ordenadores es diez veces mejor cada cinco años, o "10x cada 5". Los diseñadores de circuitos creen que la ley de Moore valdrá todavía durante unos diez años —otro factor de cien— antes de que un muro mecanocuántico impida nuevas mejoras.

La ley de Moore, recalculada para un período de cuatro años, baja de 10 a un factor de seis. Aplicado ello a las películas parece decirnos que, para cuando se concluyó *Toy Story 2* en 1999, deberían haberse convertido los 3-17 millones de polígonos por fotograma de 1995, el nivel de complejidad de *Toy Story*, en 18-102. Un polígono es la unidad geométrica mínima que se maneja. En las películas digitales cada objeto y cada personaje se conforman modelando su superficie mediante la adición de esferas, cilindros, conos y demás cuerpos euclídeos. Acostumbramos representar una superficie con una aproximación de polígonos muy pequeños; el número total de éstos es, pues, una buena medida de la complejidad geométrica de un objeto y, por tanto, de una escena. Loren Carpenter, Ed Catmull y Rob Cook enunciaron el principio de que 80 millones de polígonos por fotograma era el umbral de realidad, principio hoy aceptado.

Con los 24 fotogramas por segundo de una película, el umbral de realidad es, pues, de 1900 millones de polígonos por segundo; con los 30 de la televisión o de la cinta de vídeo, 2400. Los ordenadores de última hornada pueden vérselas sólo con pocos millones de polígonos por segundo. Sería maravilloso generar la realidad en tiempo real, pero el negocio del cine se conformaría con alcanzarla. Para hacerse una idea de cuán lejos está aún el tiempo real, recuérdese que cada fotograma de *Toy Story* llevó de media siete horas de cálculo; también hicieron falta varias horas por fotograma en *Toy Story 2*; en alguno de los fotogramas más complejos se invirtieron más de 50.

Una vez concluida, *Toy Story 2* sólo había duplicado la complejidad de su predecesora y tenía entre 4 y 39 millones de polígonos por fotograma. Lo que sí aumentó seis veces en esos cuatro años fue el tiempo total de ejecución por fotograma, al menos para ciertos fotogramas. Don Schreiter, de Pixar, volvió a ejecutar algunos fotogramas de ambas películas para este artículo con un mismo equipo informático, uno de ahora; así la comparación era directa. En calcular los fotogramas de la película más reciente se tardó de seis a trece veces más. Los promedios ofrecidos por Bill Reeves, de Pixar, tomados con todos los fotogramas de las dos películas, dan una proporción de cerca de cinco a uno.

Ni siquiera con 80 millones de polígonos por fotograma podríamos pretender que habríamos reproducido la realidad. La verdadera realidad puede hasta tener una complejidad fractal: que cuanto más de cerca se mire, más parezca el objeto lo mismo y siga siendo igual de complejo. Pero casi todos aceptaríamos como realismo una complejidad de orden visual. Es un error creer siquiera que el verdadero realismo es nuestro objetivo. Nunca son reales las películas. El diálogo se pone después, los decorados tienen falsos frontales, la iluminación es artificial y el montaje juega con el tiempo. La palabra "realismo" se refiere a una representación convincente de la realidad. El uso que se haga de ella puede ser de lo más surrealista. Como he dicho a menudo, la realidad es sólo una medida oportuna de la complejidad.

Mis compañeros calcularon la cifra de 80 millones de polígonos tomando en cuenta lo que el ojo humano ve en una imagen. Suponga que una escena que va a contemplar se divide en una retícula formada por cuadrados muy pequeños, que en el modelo del ordenador se re-





presentan con un punto de luz (un elemento de imagen o píxel). Para hacerse una idea, los fotogramas de *Toy Story* y *Toy Story 2* tienen 1,4 millones de píxeles, y los de *Bichos* 1,8 millones. *Monsters, Inc.* (la próxima película de Pixar) tendrá dos millones. Un píxel representa, a través de un solo color, el promedio de todos los rayos de luz que dan en uno de los cuadraditos de la escena proyectada. Ese haz de rayos de luz puede incluir la imagen de unos cuatro niveles de superficies; cada nivel comprende unos ocho polígonos. Hay, pues, 32 polígonos por cada píxel de los haces, o 32 millones de polígonos por cada millón de píxeles de resolución del fotograma. Estamos considerando fotogramas con 2,5 millones de píxeles; salen, por tanto, 80 millones de polígonos por fotograma.

Una nueva realidad

El número de polígonos por fotograma varía con la resolución final de las imágenes. Hay que encontrar un criterio de máxima realidad, desde el punto de vista del espectador, que sea independiente del número de píxeles de un fotograma. Según este enfoque (promovido por Reeves, Catmull, Oren Jacob y Galyn Susman), está fuera de lugar contar polígonos o cualquier otra medida geométrica. No es lo mismo complejidad geométrica que realismo; aquélla sólo es un diez por ciento de éste. ¿Y lo demás?

Un factor importante es la combinación de figura y gradientes de luz. La figura es un concepto tetradimensional que abarca la geometría del objeto o personaje con su movimiento. La calle arbolada de *Toy Story 2* es mucho más realista que la de *Toy Story* gracias a los movimientos sutiles de las hojas, que contribuyen en mayor medida a la verosimilitud que la exactitud geométrica de los objetos en reposo. Los gradientes de luz de los objetos los colorean y además les dan iluminación, textura y constitución material determinada. La iluminación ha resultado ser una parte especialmente difícil del gradiente. Calcularla de forma directa por medio de la física es demasiado laborioso; la madre naturaleza lo hace en paralelo y en tiempo real, y los ordenadores no son capaces de tanto.

En general, la parte correspondiente al gradiente lumínico del "otro 90 por ciento" de la realidad deberá resultar mucho más sencilla cuando la ley de Moore reduzca las horas de ejecución a segundos. Pero los espectadores humanos quieren además exactitud. Mírese una silla marrón de cerca; no es toda "marrón", habrá manchas y motas de otros colores. La sociedad tiene un nombre para algo que es casi un ser humano pero no del todo: monstruo. Los que se dedican a la creación de imágenes por ordenador prefieren simplificar los seres humanos —que sean dibujos animados a las claras— a arriesgarse a que se los vea como monstruos. O hacen monstruos a propósito, como en *El hombre sin sombra*. O representan animales, como el ratón de *Stuart Little*. De ese ratón se ha dicho que merece ser considerado el mejor actor artificial de una película con actores reales hasta la fecha, habida cuenta de la complejidad de la representación y la capacidad interpretativa.

Para resolver estos problemas se requieren instrumentos capaces de preparar modelos de representaciones minuciosas sin que su complejidad sea desesperante. La construcción de modelos basados en la física será útil una vez se hayan traducido mejor a rutinas de ordenador manejables las complicaciones de la física de la forma y el movimiento. Por dar un ejemplo: no empeñarse en crear una trabajosa animación que imite los movimientos de un saltador de juguete, si podemos calcular los fotogramas con un programa que incluya un modelo del comportamiento de un muelle.

La captación del movimiento podrá echar una mano también, como en *El hombre sin sombra*. Vístase a un hombre con una malla que lleve marcadas señales de referencia, fílmesele contorsionándose en una tabla de surf y guíese el animador con esos fotogramas. Parecerá que eso ha de dar mucho juego, pero no se sabe muy bien cómo hacerlo. Si sólo se van tomando muestras de un movimiento humano punto a punto, no lograremos un óptimo resultado final. Los animadores han compensado esa deficiencia con trucos clásicos de la animación: anticipaciones, aplastamientos, estiramientos y exageraciones. Necesitamos ahora programas que hagan de manera automática





5. La verosimilitud progresó de *Toy story* (*a la izquierda*) a *Toy Story 2*. Se duplicó la complejidad geométrica y se decuplicó el tiempo de cálculo a fin de mejorar la iluminación y las texturas y añadir movimientos sutiles, como el temblor de las hojas, que aumentan mucho la sensación de realidad.

esas cosas para los modelos tridimensionales de los movimientos captados.

Hay una técnica, la "ejecución basada en imágenes", que nos permitirá medir la realidad con mayor precisión. En estos momentos nos valemos de dos métodos diferentes para hacer imágenes con los ordenadores: la geometría (polígonos) y la toma de muestras (la digitalización de un objeto que lo convierte en un conjunto de píxeles). Ambos métodos convergen en la ejecución basada en imágenes, donde el que maneja la cámara la apunta a un objeto (un jarrón, por ejemplo) desde todos los ángulos. Se digitaliza cada fotograma. El ordenador determina por triangulación dónde "vive" cada píxel en el espacio tridimensional y crea así un modelo en tres dimensiones del objeto o, al menos, de su superficie. De esta forma el elemento fundamental de las imágenes por ordenador, el píxel bidimensional, se convierte en píxel tridimensional, o vóxel.

A medida que el número de controles para un personaje vaya pasando de cientos (Woody en *Toy Story*) a miles (Al en *Toy Story 2*) y de ahí a los cientos de miles, millones incluso, necesarios para que salgan seres humanos verosímiles, nos irán haciendo falta herramientas poderosas que se parezcan a las que se aplican con una simple pulsación.

No cabe ya ninguna duda de que la sociedad está en medio de una revolución del espectáculo. La animación empezará, si no a sustituirla, a acercarse a la actuación real. Actores y avatares son dos cosas distintas. Los que hacen películas digitales sustituyen una representación por otra, no el actuar mismo. El talento de actor no sufrirá menoscabo. Lo esencial es encontrar la interfaz entre el actor y el modelo realista y que el actor se adapte a esa manera de actuar. Nos llevó veinte años pasar de la idea inicial a la primera película realizada por completo con ordenador. Quizá los veinte siguientes nos traerán la película sin cámara con perfecta apariencia de realidad. Y será obra de artistas y de técnicos.



El autor

ALVY RAY SMITH, doctor en informática y cofundador de Pixar Animation, ha dirigido las investigaciones infográficas de Lucasfilm y trabajado en Microsoft en ese mismo campo. Ha ganado dos óscars por sus logros técnicos.

Bibliografía complementaria

THE FEELING OF WHAT HAPPENS: BODY AND EMOTION IN THE MAKING OF CONSCIOUSNESS. Antonio Damasio. Harcourt Brace, 1999.

BUILDING A BETTER MOUSE. Barbara Robertson en *Computer Graphics World*, vol. 22, núm. 12, págs. 32-40; diciembre de 1999.

VISIBLE DIFFERENCE. Barbara Robertson en *Computer Graphics World*, vol. 23, n.º 7, páginas 26-34; julio de 2000.

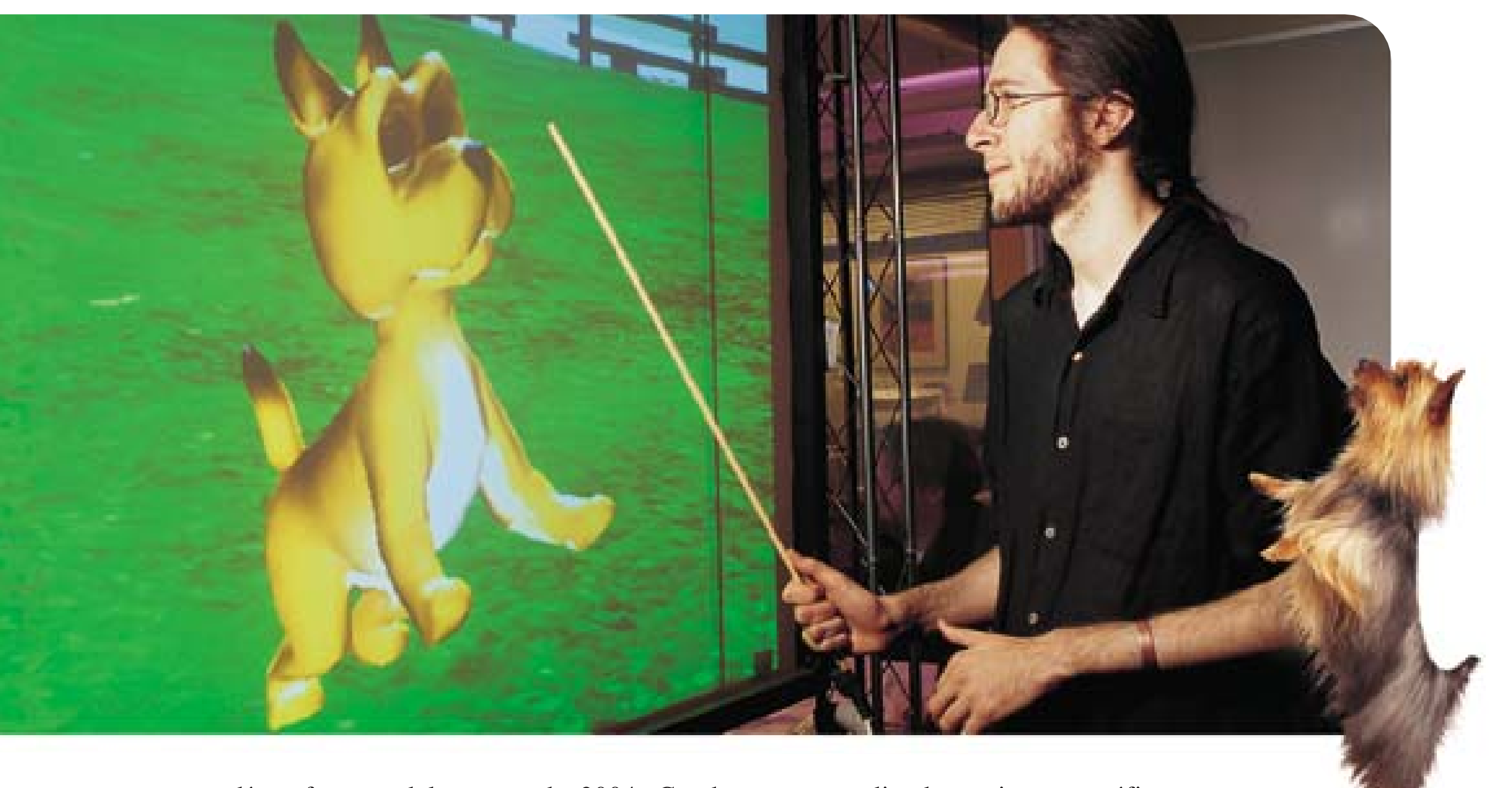
Películas notables por su infografía y efectos especiales:

THE RESCUERS DOWN UNDER (Los rescatadores en Cangurolandia, Disney, 1990). THE LION KING (El rey León, Disney, 1994). TOY STORY (Disney, 1995). TITANIC (Fox-Paramount, 1997). A BUG'S LIFE (Bichos, Disney, 1998). ANTZ (Hormigaz, DreamWorks, 1998). STUART LITTLE (Sony, 1999). TOY STORY 2 (Disney, 1999). CHICKEN RUN (Evasión en la granja, DreamWorks, 2000). HOLLOW MAN (El hombre sin sombra, Warner, 2000).

Un mundo virtual a medida

Nacerán pasatiempos que sean realmente interactivos cuando los ingenieros y los artistas creen mundos virtuales que en su discurrir parezcan espontáneos

Glorianna Davenport



DUNCAN, un perro virtual, aprende monerías de manera muy parecida a como lo hace su versión real.

Un día sofocante del verano de 2004. Conduzco, en medio de un intenso tráfico, mi nuevo coche —un Vehículo de Puro Entretenimiento, un VPE— camino del campamento de verano de los niños. Miro por el retrovisor y veo un BMW descapotable que se nos viene encima. Me echo a la derecha para dejarlo pasar. Conducir sigue siendo para mí la aburrida tarea de siempre; para mis hijos, Jamie y Joy, el viaje es, sin embargo, una aventura, la que han escogido ellos mismos.

Desde el asiento trasero ven a ese deportivo lanzado como un *Tyrannosaurus rex* en estampida, que mueve las patas con violencia y lleva la lengua colgando. Cuando pasa veloz por la "ventanilla" lateral holográfica, Joy le pega con su piruleta, que se queda adherida a la pantalla. El ordenador de a bordo del VPE reacciona ante la impertinencia prepotente del otro, mandándole al visor de su salpicadero un mensaje: "¡Eh, ve más despacio!" De pronto, en la holoventanilla aparece un coche de policía en la guisa de pterodáctilo que persigue al lagarto tremebundo. El *T. rex* vuelve la mirada y lanza un chillido pavoroso cuando el reptil volador le coge la cola. "¡Le pilló!", exclama feliz Jamie mientras relámpagos y negros nubarrones dan carácter a esa caza jurásica.

¿Parece una locura un turismo que entretenga a sus pasajeros con un mundo interactivo de fantasía? Casi tenemos en la mano la técnica necesaria. Muchos automóviles llevan ya receptores de GPS (Sistema de Localización Mun-

Evolución de los pasatiempos interactivos

Desde los años cincuenta vienen invitándonos a la interacción los pasatiempos electrónicos, pero casi nunca tienen la facultad de improvisar. La fusión de distintos elementos, de un escenario "inteligente" y actores sintéticos con una refinada infografía, creará mundos de virtuales que irán mucho más allá de cualquier cosa que podamos ver hoy.

1953

Winky Dink y usted (CBS)
Experimento primitivo de televisión interactiva. Los espectadores ponen láminas de plástico sobre la pantalla y unos dibujos animados hacen de guías de unos ejercicios de dibujo.



1972

Pong (Atari)
El espectador pasivo se convierte en jugador interactivo que, mediante un mando redondo, controla una pala de ping-pong en una pantalla de televisión.

1977

Aventura (Will Crowther y Don Woods)
En los albores de la ficción interactiva: una historia, en forma de texto, se desarrolla en la pantalla del ordenador a medida que el jugador teclea órdenes que ponen en marcha la siguiente acción. El juego consistía en resolver un enigma.

1983



Dragon's Lair (Don Bluth, Cinematronics)
La técnica del láser-disco permite dar el paso a un mundo que produce una poderosa sensación visual de tridimensionalidad. El jugador controla un personaje de rasgos humanos, no un objeto inanimado.

dial), que determinan con precisión la latitud y la longitud gracias a una red de satélites. Los fabricantes esperan conectar pronto los conductores a Internet. De aquí a diez años podrían sustituirse las ventanillas por pantallas holográficas ultradelgadas e instalarse cámaras de vídeo en miniatura que capten lo que pase en la carretera y dentro del vehículo. Una programación especial convertiría los movimientos relativos del automóvil y las acciones de los pasajeros en una fantasía digital, en un mundo virtual. El VPE es sólo una de las posibilidades del futuro, pero anuncia una era nueva de medios interactivos de entretenimiento digital.

Los ingenieros llevan intentando crear pasatiempos interactivos desde los años cincuenta, pero la mayoría de los disponibles hoy en día obligan todavía a un tipo u otro de toma y daca indeseable. Si se quiere un relato interesante hay que aceptar, por lo normal, la pasividad de ver cine o televisión. Si se prefiere tomar decisiones, como se hace en los juegos de vídeo y ordenador, se suele sacrificar un buen argumento. El futuro de los pasatiempos digitales, combinado con una capacidad gráfica de los ordenadores que dé para ejecutar una historia en tiempo real, hará que converjan narración prefijada y elección personal.

Varias innovaciones encierran la clave de estos avances inminentes. Gracias a un ancho de banda creciente va siendo posible escoger espectáculos de manera personalizada en redes centrales de distribución, un servicio de petición de películas, por ejemplo. Nuevas formas de entrada de datos, como las pantallas activadas con el tacto y los dispositivos de reconocimiento de la voz, están cambiando la manera de comunicarnos con Internet u otras redes. Nuevos tipos de visores y emisores de sonido crean entornos sensoriales aún más realistas. Y las técnicas inalámbricas miniaturizadas hacen que puedan ser portátiles los aparatos de cálculo y comunicación y acercan el espectáculo digital al ordenador de bolsillo, al reloj de pulsera y hasta a las ventanillas del automóvil. A medida que la técnica mediática pase de las salas de cine y cuartos de estar a nuestro mundo cotidiano se multiplicarán los medios de entretenimiento digitales allá donde estemos, en los momentos en que seamos receptivos a ellos, presentes en uno u otro dispositivo.

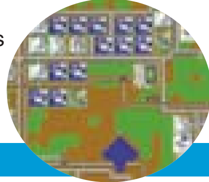
Por su propia naturaleza, la técnica interactiva ofrecerá además abundantes opciones para configurar el decurso de una historia, así que la experiencia de un espectáculo vivida por dos personas diferentes no tendrá ya por qué ser siempre la misma. No necesitaremos guiones completos por anticipado, porque quienes entren en la historia se convertirán en los personajes que la harán avanzar. Puede que un escritor conciba las circunstancias iniciales, pero la historia se desenvolverá luego de forma improvisada. El entorno de la historia —y los personajes que la protagonicen— reaccionarán a mensajes personales, noticias y otros modos de información. Este tipo de ficción virtual necesitará una red de bases de datos dotada con elementos narrativos suficientes y con algoritmos de toma de decisiones que generen una diversidad de acciones fortuitas con un contenido que no se repita.

Escenarios inteligentes y actores animados

Otro componente necesario de un mundo de ficción virtual es el escenario interactivo de la acción. En él será donde pueda encontrarse, crearse y compartirse el contenido, adonde se manden mensajes informativos y donde se reciban, el lugar en el que los personajes virtuales se dediquen a lo suyo o interaccionen con el público. No existe un medio así, pero un nuevo tipo de portal del ciberespacio que se está elaborando en estos momentos en el Laboratorio Mediático (Media Lab) del Instituto

1989

Sim City (Will Wright, Maxis)
Introduce la interactividad sin resultado prefijado. Los jugadores intentan construir buenas ciudades tomando decisiones acerca de la red eléctrica, la vivienda, las industrias, etc.



Regreso al futuro: El viaje (Universal Studios Florida, Berkshire Ridefilms)
Convergencia en la sala no sólo de la vista y del oído, sino también de otras percepciones sensoriales.

1993

Doom (id Software)
Este juego de acción tridimensional populariza las partidas de jugador múltiple. Personas de todo el mundo juegan entre sí en tiempo real vía Internet.

Myst (Cyan)
Desarrolla historias en las que hay que resolver un enigma, como en Aventura, pero dentro de un mundo de expresivas imágenes de ordenador.



1965

The Spot (American Cybercast)
Primer culebrón interactivo de la WWW (un “Webisodic”). Los espectadores comunican qué creen que deberían hacer a continuación los personajes.

2000

Cyberdome Theater (Boeing)
Los miembros del público controlan lo que se experimenta en la sala dirigiendo imágenes de ordenador tridimensionales por medio del teclado con cinco botones instalado en el brazo de cada butaca.



El gran hermano (Endemol Entertainment)
El público influye en lo que va a pasar votando quién debe salir de una casa donde la vida de un grupo transcurre sin atenerse a un guión. Los espectadores pueden observar en la Red durante las veinticuatro horas del día qué está sucediendo dentro.

de Tecnología de Massachusetts, el Happenstance, podría ser un primer paso prometedor. Es un paisaje animado, generado por sistemas gráficos de ordenador, que maneja la información según las preferencias y la situación de un usuario concreto.

Como nos enseña el cine, los paisajes proporcionan una ilusión de continuidad espacial y temporal. Las representaciones gráficas del tiempo atmosférico, de plantas y de otros componentes del entorno natural ofrecen esa misma ilusión en el ciberentorno del Happenstance. La ventana a ese mundo es el monitor del ordenador, y con un ratón y un teclado numérico se puede navegar y enviar órdenes, pero ahí termina la semejanza con las interfaces gráficas corrientes. Esta interfaz ecológica traduce las actividades que suelen hacerse con un ordenador (buscar en Internet, por ejemplo) en movimientos por un paisaje.

Si uno desea una comida china, puede teclear una orden de búsqueda, que se pegará al icono de la simiente de un árbol, que podrá plantarse a continuación en el ciberjardín de Happenstance para que comience la búsqueda de restaurantes cercanos. Los buscadores actuales de Internet darían la lista con los resultados en forma de bloques de texto hipervinculados, pero dentro de Happenstance el resultado se verá como hojas que brotan de un árbol. Antes de que se pueda examinar las hojas, un volcán entra en erupción a lo lejos, señal de que están a punto de llegar noticias relacionadas con la consulta. Happenstance está programado para aprovechar en sus búsquedas hallazgos casuales; la consulta acerca de la comida china ha dado, además, con unos documentales cinematográficos sobre China. Un programa de montaje cinematográfico se encarga de una secuencia gráfica que se aleja del árbol y se centra en la nube de humo que sale del volcán. La nube se desplaza sobre el paisaje y precipita elementos de los documentales sobre un río que los identifica gracias a sus palabras clave.

Ni siquiera un escenario tan inteligente como la generación futura de Happenstance podrá contar una historia con toda la complejidad que a uno le gustaría. Para que se desarrolle una narración interesante hay que añadir personajes al combinado. Imagínese a una mujer que echa la buenaventura sentada junto al árbol de los restaurantes chinos, o a un perro que saca del río varios elementos de la historia. Algunos personajes podrían ser proyecciones de elementos no humanos de la vida real, un *T. rex* de un BMW. Los actores humanos —que interpretarían las partes correspondientes a los personajes diseñados por ellos mismos— entrarían en la historia a través de sus ordenadores personales u otros dispositivos. Un tercer grupo de actores semiautónomos, seres virtuales que formarían parte del entorno, podría colaborar también en el desarrollo ulterior de la historia.

Crear actores sintéticos convincentes no es tarea fácil. Una narración interactiva satisfactoria requiere personajes capaces de expresar emociones e improvisar acciones, que tengan su propio espíritu y puedan sorprendernos. Personajes así serían muy diferentes de los mejores que forman la generación actual de juegos de ordenador. Estos seres parasitarios pueden ejecutar acciones programadas impresionantes, pero son incapaces de improvisar y de mantener alguna relación con los jugadores.

Bruce Blumberg, de Media Lab, pretende escalar la barrera técnica que separa a los parásitos de los actores dando a los seres virtuales el “seso” que les haría falta para reaccionar ante situaciones no previstas en el guión. Idea modelos de ordenador de los procesos cognoscitivos —percepciones sensoriales, aprendizaje, emociones y capacidades motrices— y los instala en personajes animados. El más reciente diseño del equipo de Blumberg es Duncan H. Terrier, un can virtual que, espera, emulará algún día a su versión real.

El cerebro de Duncan es un catálogo de “tuplas” —conjuntos ordenados de un cierto nú-

mero de elementos de tipos determinados— relativas a acciones concretas, enunciados probabilísticos que guían su comportamiento y que los programadores han sacado de la etología del aprendizaje y la conducta de los perros de verdad. Cada tupla define una acción en particular y las condiciones en que debe empezar y acabar. Algunas tuplas codifican las reacciones apropiadas a emociones, a necesidades físicas o a percepciones sensoriales. La clave de que las reacciones de Duncan sean expresivas, dice Blumberg, es añadir un modificador a cada acción programada: "Si ves comida, cómetela *deprisa* hasta que no quede nada" o "Si te dan una patada, corre, *gimiendo*, hasta que estés a una distancia segura". Cada tupla tiene, además, un valor que se sigue de sus consecuencias. Engullir un bizcocho para perros cambia el hambre y reduce, pues, el valor de comer.

Buena parte de la programación de Duncan hace que se incline por instinto, como los perros reales, a agradar a su amo. Duncan le "observa" desde un monitor de vídeo; el programa traduce su presencia y voz en percepciones sensoriales que el perro virtual puede entender. El amo se pone ante éste sobre una tabla basculante que registra continuamente los cambios de dirección de su peso, que se convierten en desplazamientos por los páramos escoceses donde Duncan vive.

Como los perros de verdad, Duncan no tiene al principio ni idea de que hacer determinadas cosas en respuesta a órdenes verbales específicas traerá su recompensa, sino que lo descubre a través de la experiencia. (El adiestramiento de Duncan se basa en el método que condiciona a los perros de verdad haciéndoles oír clics.) Al principio Duncan elige al azar sus actos, "sentarse" o "moverse". Cuando se quiere que prosiga en la acción comenzada, se aprieta un botón que le manda una señal de aprobación, un bizcocho canino virtual. Como sentarse da buenos resultados, el valor de hacerlo aumenta y es más probable que se comporte así en el futuro. La memoria estadística de Duncan sigue la pista de qué estaba pasando en el mundo cada vez que realizaba esa misma acción e intenta determinar en qué contextos resulta probable que se encuentre con una golosina. Si se le da una indicación verbal justo cuando va a sentarse, y si se le recompensa sobre todo en esos casos, acabará por aprender que sentarse cuando se le dice "siéntate" es un medio mejor de ganarse un regalo que hacerlo simplemente cuando el amo está por allí sin más.

Las treinta y tantas tuplas de Duncan, que representan comportamientos aprendidos e innatos, están siempre compitiendo. Justo cuando uno piensa que ha atraído toda la atención de Duncan, puede que se ponga a perseguir una ardilla que corretea. Es más posible que haya comportamientos que sorprendan si se añaden al mundo de Duncan ovejas y lobos, cada animal con su propia programación. Quizá choque, pero es probable que no sea la potencia de cálculo el mayor obstáculo para engendrar personajes más avanzados que Duncan, sino descubrir cómo han de integrarse motivación, emoción y capacidad de aprendizaje de manera convincente.

Hacia allá

La fusión de escenarios icónicos inteligentes y de actores sintéticos en una vasta red de cálculo abrirá las puertas a espectáculos digitales interactivos ahora insospechados. Pero la programación del conjunto de imágenes resultante de la interacción fortuita entre los personajes es de por sí una tarea formidable. La industria de los pasatiempos digitales tendrá además que acordar unas pautas comunes que alienten la construcción de una infraestructura y la producción masiva de nuevos aparatos que operen juntos.

Incluso aunque los ingenieros y los artistas puedan desarrollar la técnica, la infraestructura y las ideas, todavía habrá que vérselas con la economía. ¿Quién contribuirá a esas historias en marcha y quién las pagará? Una estrategia posible sería recurrir a las microtransacciones: pagar por las partes de la historia que uno vea y que a uno le paguen por su contribución. Otra posibilidad sería comercializar experiencias que tuviesen lugar en salas de cine en las que el público controlase la historia. Al contrario que en la experiencia cinematográfica de hoy, pasiva, en la nueva una base de datos narrativa permitiría que el devenir de la película se gestase sobre la marcha. Los componentes se escogerían conforme a la suma, calculada por ordenador, de la experiencia colectiva vivida ya en el cine por el público. La lista de esas experiencias pasadas, almacenada en una tarjeta de sala, garantizaría que la nueva experiencia sería diferente de cualquiera que un miembro del público hubiese tenido antes.

Quizá falten todavía años para que exista el mundo virtual de los espectáculos digitales interactivos. Pero proyectos como Duncan y Happenstance empiezan a llevarnos a esa meta.



La autora

GLORIANNA DAVENPORT dirige la sección de cine interactivo del Laboratorio Mediático del Instituto de Tecnología de Massachusetts, en cuya fundación intervino. Empezó a enseñar realización en la Escuela de Cine del MIT en 1978 y contribuyó a que se incluyese el vídeo en el currículum. Ha participado en la creación de Media Lab Europe.

Bibliografía complementaria

Visite el Laboratorio Mediático del Instituto de Técnica de Massachusetts en www.media.mit.edu.

Lea la historia de Pong en www.pong-story.con/intro.htm

Encuentre información acerca de Myst en http://sirrus.cyan.com/Online/Myst/MystHome

La mejora genética del trigo

Gracias al avance de las técnicas de la biología molecular, se está logrando una mayor eficacia de los programas de mejora, un conocimiento más profundo de la genética de los caracteres de interés agronómico y nuevos sistemas de alteración de las propiedades hereditarias

Pilar Barceló y Adoración Cabrera

El trigo constituye el alimento principal de un tercio de la población humana. Se trata de un componente fundamental de la alimentación debido a su alto valor nutritivo, con un 10 % de proteína, un 2,4 % de lípidos y un 80 % de carbohidratos. Aporta el 20 % de las calorías que el hombre necesita.

Los avances de la mejora genética de este cereal han ido en paralelo con la propia trayectoria humana. La agricultura, surgida hace unos 10.000 años en el Neolítico con la domesticación de especies silvestres, tuvo sus hitos iniciales con el cultivo en el Próximo Oriente del trigo duro (*Triticum turgidum*) y la cebada (*Hordeum vulgare*). El proceso de domesticación deja en manos del hombre el control de la reproducción y ocasiona cambios en la planta adaptándola a sus necesidades. Unos cinco mil años después aparece el trigo harinero (*T. aestivum*) a partir del cruzamiento natural entre el trigo duro cultivado (*T. turgidum*) y una especie silvestre (*Aegilops tauschii*).

La selección inconsciente, por un lado, y la dirigida, por otro, dieron como resultado que se favorecieran los genotipos de trigos mejor adaptados para la siembra. En el dilatado intervalo temporal que llega hasta el siglo pasado los avances en la mejora no brotaron de innovaciones científicas y técnicas, sino de la experiencia adquirida y transmitida de padres a hijos.

PILAR BARCELO y ADORACION CABRERA abordan la mejora del trigo desde enfoques complementarios. Barceló, investigadora de la compañía DuPont, trabaja en el equipo de transformación del trigo. Cabrera, profesora del departamento de Genética de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes de la Universidad de Córdoba, se interesa por la hibridación interespecífica como método de introgresión de genes en el trigo.

Con el redescubrimiento de las leyes de Mendel a principios del siglo XX, la selección artificial se dota de una base científica, si bien desde varios decenios atrás se disponía de métodos empíricos de mejora que habían aportado buenos resultados. De hecho, los primeros datos que se conocen sobre diferencias precisas en la reacción del trigo ante las enfermedades son de mediados del siglo XIX, cuando el campo inglés obtiene variedades resistentes a la roya.

En la segunda mitad de siglo XX se desarrollan las técnicas de cultivo *in vitro*, citogenética molecular y marcadores de ADN, que en su aplicación a la mejora de trigo están logrando una mayor eficacia de los programas de mejora, un conocimiento más profundo de la genética de los caracteres de interés agronómico y el desarrollo de nuevos sistemas de alteración de las características genéticas.

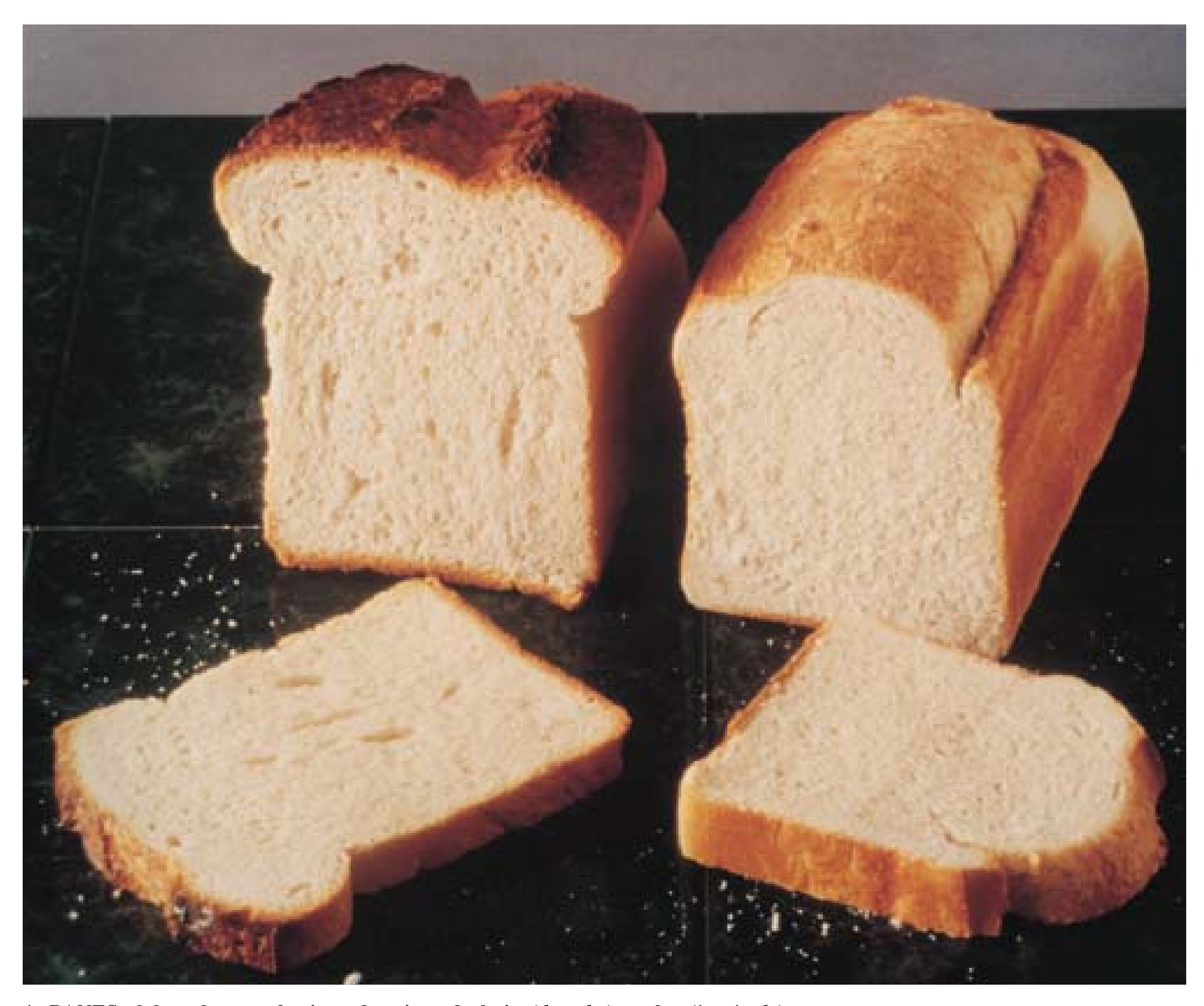
Nos ocuparemos aquí de la introducción en el trigo, por manipulación cromosómica, de genes procedentes de especies emparentadas. Abordaremos luego la aceleración de los programas de mejora mediante creación de dobles haploides (en genética se llaman haploides los núcleos que portan un juego sencillo de cromosomas) y por último describiremos las técnicas de transformación genética que han servido para incrementar la producción y mejorar la calidad harino-panadera del trigo.

La mejora vegetal es la manipulación genética de las plantas en beneficio del hombre. Mediante la combinación de los métodos de selección, cruzamiento, mutagénesis y manejo cromosómico podemos modificar los genotipos de las plantas y seleccionar los que porten los genes responsables de los caracteres deseados. Con esas técnicas se ha conseguido transferir segmentos de material hereditario entre variedades o entre especies, formando así nuevas combinaciones.

Para aplicar estas técnicas, se exige el cruzamiento entre parentales. Cabe también la mutación inducida. Este procedimiento, aunque de escasa eficacia por la impredictibilidad de sus resultados, ha cosechado cierto éxito en la obtención de nuevos mutantes morfológicos en trigo, particularmente genes de enanismo, mediante la aplicación de la radiación gamma y de tratamientos con agentes químicos.

Una técnica del siglo XIX que sigue en uso es la hibridación interespecífica. La obtención de híbridos interespecíficos y la posterior duplicación del número cromosómico permiten la creación de nuevas especies, que combinan los genomas de dos especies diferentes, o de nuevas combinaciones de genes de las que resultan mejores variedades.

La hibridación interespecífica e incluso intergenérica ha desempeñado una función muy importante en el incremento de la variabilidad genética de los trigos cultivados. La introgresión en trigo de material genético procedente de especies filogenéticamente emparentadas ha posibilitado la incorporación de genes de resistencia a enfermedades y plagas o la adaptación a condiciones ambientales adversas.



1. PANES elaborados con harinas de trigos de baja (*derecha*) y alta (*izquierda*) elasticidad. El trigo constituye el alimento principal de un tercio de la población humana. Tiene un 10 % de proteína, un 2,4 % de lípidos y un 80 % de carbohidratos.

La transferencia de material genético procedente de especies emparentadas se lleva a cabo mediante cruzamiento con el trigo, rescate de embriones y retrocruzamiento de las plantas híbridas para restaurar la fecundidad, seguido de varios ciclos de retrocruzamiento y selección.

En otros casos se ha utilizado un método indirecto que conlleva la formación de un anfiploide artificial entre el trigo y la especie donadora tras la duplicación del número de cromosomas del híbrido. Este anfiploide resultante sirve de puente para la introgresión de los caracteres deseados. En otros casos, el anfiploide puede dar lugar a una nueva especie cultivada, así el triticale, que combina los genomas del trigo y del centeno.

La obtención de estos híbridos y anfiploides se hizo posible merced al refinamiento de las técnicas de rescate y cultivo de embriones inmaduros, así como al descubrimiento de la duplicación cromosómica con colchicina, a mediados de los años treinta.

El éxito en la incorporación de material genético exógeno depende del nivel de diferenciación genética entre el genoma del trigo y el de la especie donadora (acostumbra simbolizarse el genoma de una especie por letras indicadoras de sus juegos cromosómicos, el de *T. aestivum* se designa por AABBDD). Cuando la especie utilizada como fuente de nuevo material genético guarda un estrecho parentesco con el trigo, por ejemplo *Ae. tauschii*, la especie donadora del genoma D de los trigos harineros, la introgresión se lleva a cabo mediante recombinación entre el cromosoma introducido y el equivalente al genoma D del trigo (recombinación homóloga).

Sin embargo, cuando no existe tal proximidad genética la introgresión de nuevo material depende de la inducción de recombinación homeóloga entre cromosomas de genomas diferentes o de la obtención de translocaciones espontáneas o inducidas entre ambos genomas. (La recombinación homeóloga se da entre cromosomas de origen distinto, aunque genéticamente equivalentes.)

La mutación *ph*, obtenida por Sears mediante rayos X en los años setenta, permite la recombinación homeóloga entre cromosomas. En presencia de la mutación *ph* se produce recombinación, por ejemplo, entre los cromosomas 1R del centeno y cromosomas 1A, 1B y 1D del trigo; en éstos se introducen pequeños fragmentos cromosómicos de centeno. El

gen *ph* proporciona, además, un medio de reducir la introgresión de material genético no deseado cercano al gen de interés.

Mediante translocaciones intergenómicas espontáneas o inducidas se puede también incorporar material genético exógeno. Se trata, no obstante, de un método menos específico de lograr la reducción en la cantidad de material genético introgresado, aunque se han obtenido por esa vía importantes variedades comerciales de trigo; baste recordar la translocación 1RS-1BL, portadora de resistencias a enfermedades conferidas por el segmento de centeno introducido.

La detección e identificación de los cromosomas o segmentos cromosómicos introgresados durante los ciclos de selección puede realizarse ya de una forma eficaz con las técnicas de citogenética molecular y de marcadores moleculares.

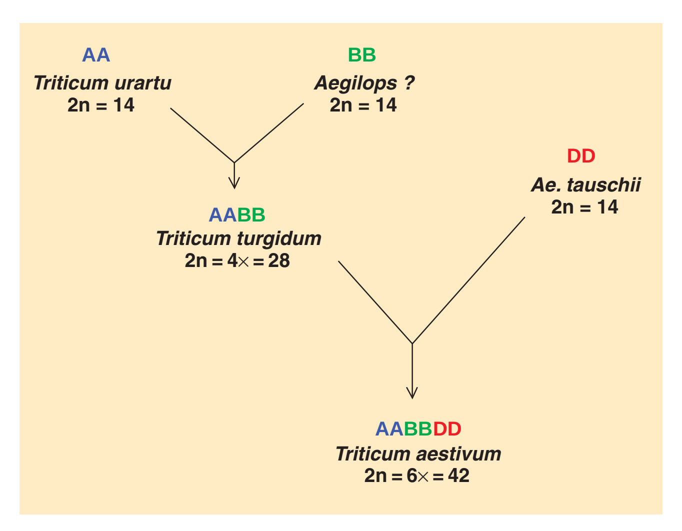
La técnica de hibridación *in situ* fluorescente (FISH), al discriminar entre cromosomas o segmentos cromosómicos de diferentes genomas, facilita el examen de la estructura genómica de los híbridos interespecíficos y de los aloploides obtenidos de ellos, la detección de reorganizaciones cromosómicas y la detección de translocaciones entre cromosomas procedentes de diferentes genomas.

Con la aplicación de la técnica FISH podemos distinguir entre apareamiento cromosómico intra e interespecífico y averiguar, por ende, la homeología entre diferentes genomas. Esta técnica permite también la localización física de genes de bajo número de copias en los cromosomas.

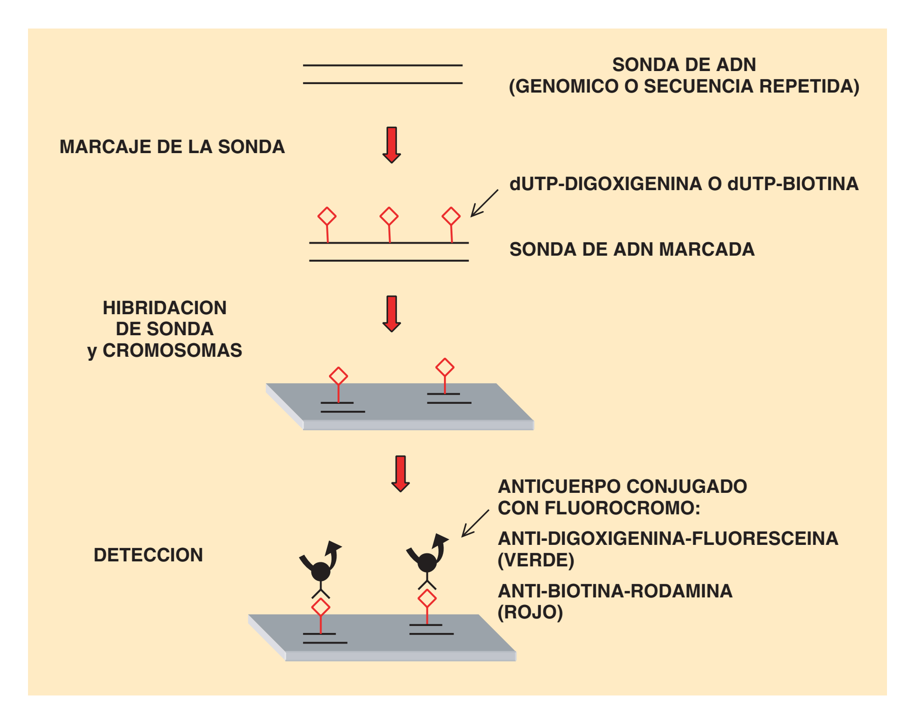
Todas las técnicas tradicionales de mejora invierten mucho tiempo en la creación de nuevas variedades. El método genealógico requiere varias generaciones de autofecundación y selección para alcanzar los niveles de homocigosis y, por tanto, de estabilidad genotípica, necesarios para la obtención de una variedad nueva.

Dentro de las técnicas de cultivo de tejidos, aplicadas a la mejora de trigo, destaca la de obtención de dobles haploides a partir del cultivo de anteras. Este método acelera el establecimiento de la homocigosis e incrementa la eficiencia de la selección, gracias a la mayor proporción de varianza genética disponible para la selección de los caracteres cuantitativos y a la ausencia de efectos debidos a la dominancia de genes mayores. Como resultado de todo ello, podemos conocer mejor los genotipos dentro de cruces, separar éstos y lograr una mayor respuesta a la selección a través de las generaciones. Pero la técnica adolece de una limitación importante: no todos los genotipos de trigo responden bien al cultivo *in vitro* de anteras.

Para superar ese inconveniente, se recurre al cruzamiento intergenérico de trigo con maíz. Con la eliminación de los cromosomas de maíz cuando se le utiliza como polinizador en cruzamientos con trigo, y la posterior duplicación cromosómica de



2. TRIGO HARINERO (*Triticum aestivum*). Porta tres genomas emparentados, A, B y D, respectivamente. Esta especie hexaploide de 42 cromosomas se originó a partir del cruzamiento de un trigo duro tetraploide (*T. turgidum*, de constitución genómica AABB) y uno diploide silvestre, *Aegilops tauschii*, donador del genoma D. El trigo duro recibió, a su vez, el genoma A de otro trigo diploide silvestre (*T. urartu*). Se discute la procedencia del genoma B, aunque existen pruebas de que *Ae. speltoides* es el donador más probable del genoma B de los trigos duros y harineros. La adicción del genoma D confiere las características harino-panaderas a los trigos hexaploides.



3. LA HIBRIDACION *IN SITU* en cromosomas requiere el aislamiento de una sonda; ésta puede ser ADN genómico total de una especie o una secuencia repetida de ADN clonada de antemano. Se procede luego al marcaje de la sonda, es decir, a la incorporación en ella de varias moléculas de dUTP unidas a una molécula de digoxigenina (dUTP-digoxigenina). La sonda marcada, desnaturalizada, se hibrida en una preparación cromosómica fijada. La sonda hibridará, de preferencia, con secuencias complementarias de los cromosomas. Para comprobar si ha ocurrido la hibridación se emplean anticuerpos anti-digoxigenina conjugados con fluorocromos.

las plantas haploides resultantes, nos hallamos ante un sistema de obtención de plantas dobles haploides de trigo independiente del genotipo, que ha reforzado el potencial del sistema de dobles haploides.

A través del cruzamiento intergenérico descrito se forman extensas poblaciones de líneas homocigóticas recombinantes. Para ello se ha contado con el refinamiento de las técnicas de castración, de frecuencias de fecundación y la aplicación de hormonas vegetales tras la polinización. Por último, gracias al progreso de las técnicas de duplicación cromosómica, principalmente mediante el uso de colchicina, podemos confiar en una alta supervivencia y eficiente duplicación cromosómica.

Pero este método sólo nos deja manipular un número reducido de cruzamientos. De ahí que la investigación de dobles haploides en trigo halla puesto la mirada en el cultivo de microsporas de cereales, de éxito refrendado en otras especies vegetales.

El análisis del control genético de los caracteres de interés agronómico, es decir, la identificación de los genes que los determinan y su localización cromosómica, desempeña una importante función en la mejora. Dichos caracteres son, unas veces, sencillos y están sujetos al control de uno o pocos genes mayores con un efecto fenotípico discreto; otras, caracteres cuantitativos, que muestran una variación fenotípica continua, resultado de la acción conjunta de muchos genes, de la interacción entre ellos y de la influencia ambiental.

En los años sesenta y setenta la utilización de aneuploides de trigo (con un número de cromosomas mayor o menor que la dotación normal) permitió identificar y situar genes que controlan el enanismo, el requerimiento de vernalización y respuesta al fotoperíodo, la morfología de la espiga, el color de la gluma y grano, las proteínas de almacenamiento y resistencia a enfermedades, entre otros aspectos de interés agronómico. Merced a la obtención de los trigos semienanos, mediante la introducción de los genes *rht1* y *rht2*, se duplicó la producción del cereal.

Pero ocurre que los caracteres de interés agronómico suelen mostrar una variación continua. El análisis del control genético completo de los caracteres de variación continua y de la localización cromosómica de los genes que la determinan es problemático, debido al número insuficiente de variantes morfológicas que permitan el desarrollo de mapas genéticos más saturados. Para superar las dificultades vienen en nuestro auxilio los sistemas electroforéticos, capaces de detectar diferencias en isoenzimas y proteínas de almacenamiento, y los marcadores moleculares, con los que podemos desarrollar mapas genéticos del trigo bastante completos.

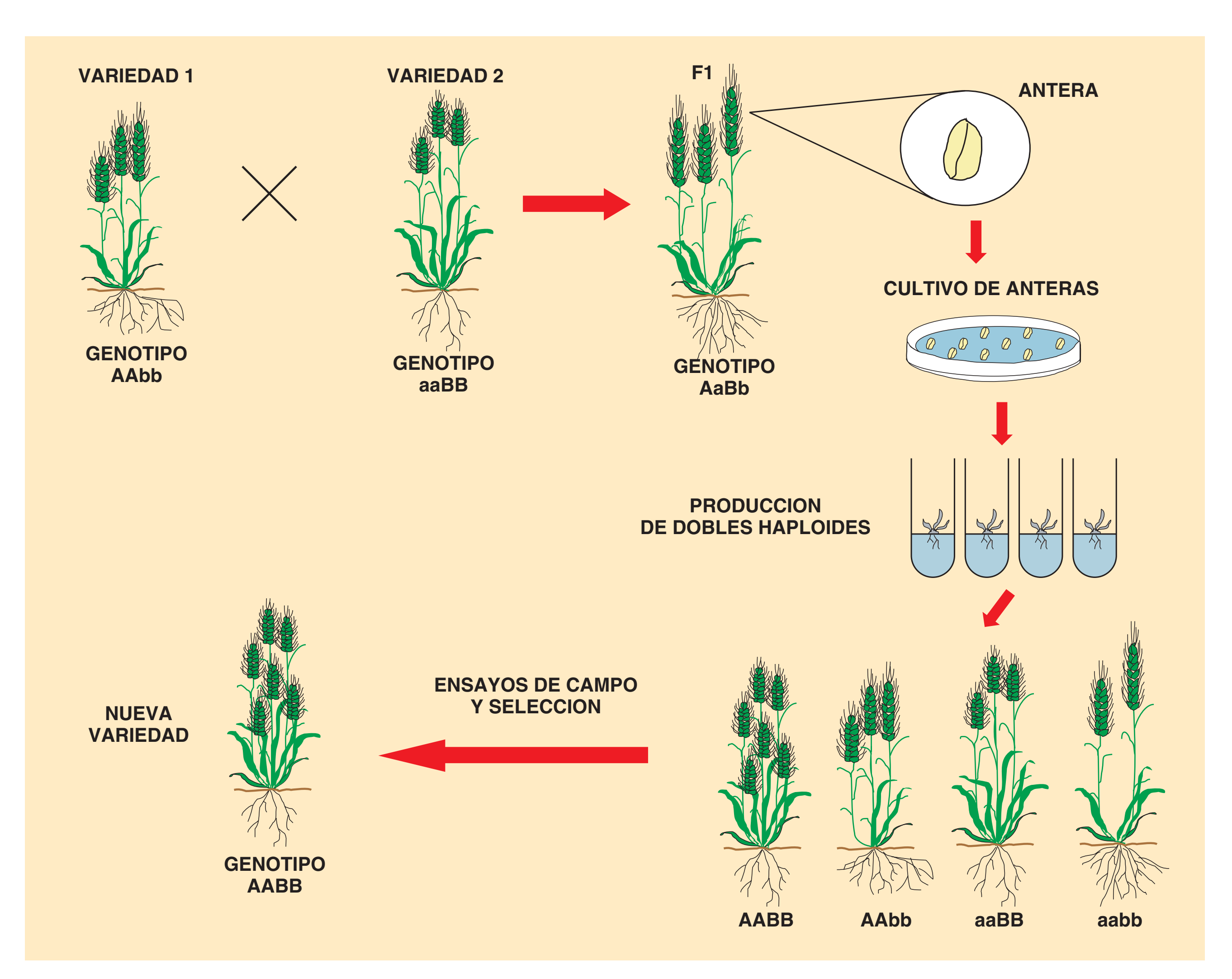
Aunque es poco probable que se puedan detectar y localizar todos los *loci* que determinan un carácter cuantitativo, la identificación de los que produzcan un efecto fenotípico notable permitirá controlar cierta proporción de la variación para el carácter. Este ha sido el caso de los que determinan la fecha de floración y la resistencia a enfermedades y plagas.

Con los marcadores moleculares conocemos si las sondas de ADN están o no presentes en el genoma de especies emparentadas. El análisis comparativo del mapa genético del trigo con el de la cebada, centeno, o incluso maíz y arroz, mediante sondas de ADN comunes, pone de relieve la persistencia del contenido de genes y el orden de los mismos en el curso de la evolución de especies distantes, aunque taxonómicamente emparentadas.

Podemos apoyarnos en esa amplia colinearidad, sobre todo la que existe entre trigo, cebada y centeno, para ahondar en el conocimiento de los caracteres de importancia agronómica dentro de un mismo sistema. Si consideramos que esta sintenia —condición en que dos o más *loci* se encuentran en un mismo cromosoma— se extiende al maíz, arroz, sorgo, mijo y algunas especies forrajeras, podría acometerse el análisis comparativo de genes y *loci* entre todas estas especies.

Una vez aislados, podremos entender mejor la estructura y función de los genes y relacionar esa información con el fenotipo de la planta. Podremos luego, mediante las técnicas de transformación, reintroducirlos en el trigo como genes

4. HIBRIDACION *in situ* en cromosomas de tritordeo, una nueva especie fértil sintetizada por Antonio Martín, del IAS-CSIC de Córdoba. Combina los genomas de dos especies diferentes: trigo duro (*T. turgidum*, *en color rojo*) y una cebada silvestre (*H. chilense*, *en verde*). Con cierta frecuencia se producen translocaciones entre los genomas de ambas especies; así, el tritordeo podría utilizarse como puente en la transferencia al trigo de caracteres de interés agronómico presentes en *H. chilense*. Las "bandas" de color verde sobre los cromosomas de trigo corresponden a secuencias del genoma comunes entre ambas especies. Las flechas indican translocaciones entre ambos genomas.



5. TECNICA DE CULTIVO DE ANTERAS para lograr nuevas variedades en un período de tiempo breve. El cultivo de las anteras se realiza a partir de plantas F1 procedentes del cruzamiento entre dos variedades o genotipos homocigóticos. Del cultivo de anteras se regeneran plantas haploides (con la mitad de la dotación cromosómica) que, tras la duplicación de cromosomas con colchicina, se obtienen plantas dobles haploides fértiles y homocigóticas. Cada planta es portadora de una combinación diferente de los genes presentes en ambos parentales. En estas plantas se selecciona el genotipo con la combinación de genes buscada.

nativos o como nuevos genes modificados.

Las técnicas de "ingeniería genética" presentan muchas semejanzas con los métodos clásicos de mejora. Unas y otros combinan material genético. Se exige en la mejora clásica una plena compatibilidad sexual entre las especies; la ingeniería genética no impone, en principio, límite alguno a la procedencia de los genes. En mejora clásica, en cada cruzamiento, se obtiene una descendencia que combina miles de genes procedentes de los parentales; sin embargo, mediante ingeniería genética se introducen uno o varios genes en cada transformación.

El mejorador cruza parentales y selecciona en la progenie las plantas con el fenotipo deseado; el "transformador" elige el genotipo o variedad que desea modificar e introduce el gen de interés, seleccionando en la descendencia las plantas que expresen el gen insertado.

Al igual que la mejora clásica, las técnicas de ingeniería genética permiten modificar caracteres ya presentes en el genotipo de partida a través del incremento o la reducción en la expresión de genes endógenos. Mas, a diferencia de la mejora clásica, la ingeniería genética permite introducir genes *de novo*, que no había en el genotipo original. Estos genes pueden expresarse y regularse en la planta transgénica del mismo modo que los genes endógenos, o bien pueden expresarse en tejidos o estadios de desarrollo en los que no son propios.

La modificación de una especie por ingeniería genética exige una caracterización exhaustiva de la ruta o rutas metabólicas responsables del carácter a modificar. Requiere también que se tengan aislados el gen o genes que codifican las enzimas o elementos reguladores de la ruta; y, por fin, que el gen introducido se exprese y se transmita a la descendencia.

Hay dos métodos básicos de transformación de plantas que permiten la introducción de ADN en el núcleo de la célula receptora. Uno, se basa en el uso de *Agrobacterium* como vector biológico; y el otro, en medios químicos, físicos o eléctricos. Se han utilizado ambos métodos en la transformación de trigo. Mediante el bombardeo con partículas de oro recubiertas de ADN, se consiguió en 1993 la transformación de trigo por los equipos de Indra Vasil y Troy Weeks. En 1996, el grupo de Chen

consiguió la transformación de trigo mediante *Agrobacterium*. Hasta la fecha, son las dos únicas técnicas disponibles de producción de plantas transgénicas de trigo.

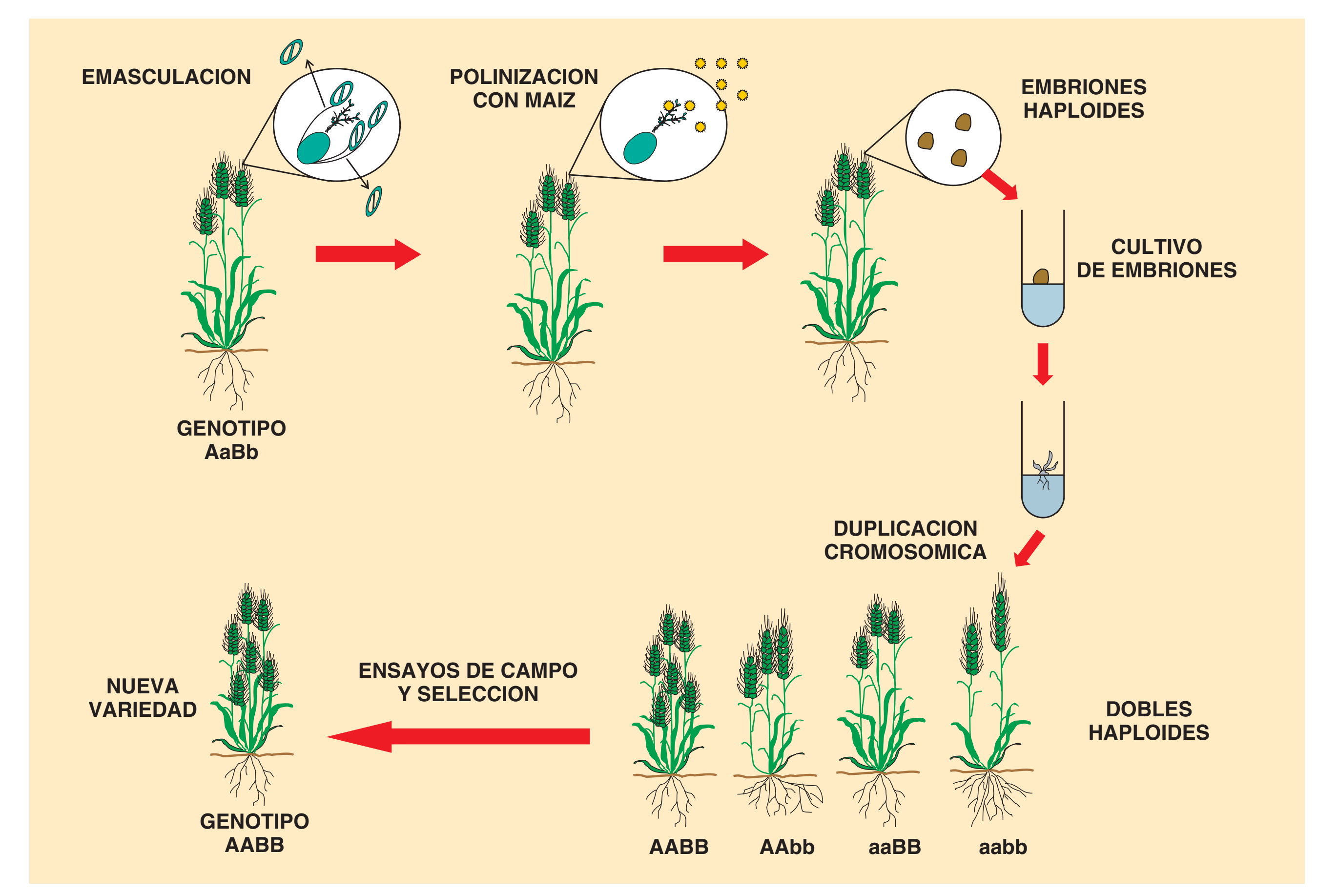
Para ilustrar la mejora del trigo por ingeniería genética fijémonos en tres trabajos recientes, relacionados con la alimentación. El principal producto elaborado a partir del trigo es el pan. La calidad panadera depende fundamentalmente de dos parámetros: elasticidad/resistencia y extensibilidad/viscosidad. Dichos parámetros dependen, a su vez, del tipo y cantidad de gluteninas y gliadinas, proteínas de almacenamiento presentes en el endospermo. La elasticidad, que viene determinada por las gluteninas, limita la utilización de las variedades de trigo europeas en la producción de harinas panaderas.

Dentro de las gluteninas, las que mayor importancia tienen en la formación de matrices elásticas son las de alto peso molecular (HMW). La presencia de las subunidades proteicas 1Ax1, 1Dx5 y 1Dy10 está asociada con una buena calidad panadera. Interesa, pues, aumentar los niveles de dichas proteínas; pero se trata de un objetivo difícil de alcanzar por mejora clásica, ya que la combinación de dos genotipos con las mismas proteínas no lleva a la obtención de un genotipo con doble cantidad de proteína, sino con la misma cantidad que los parentales.

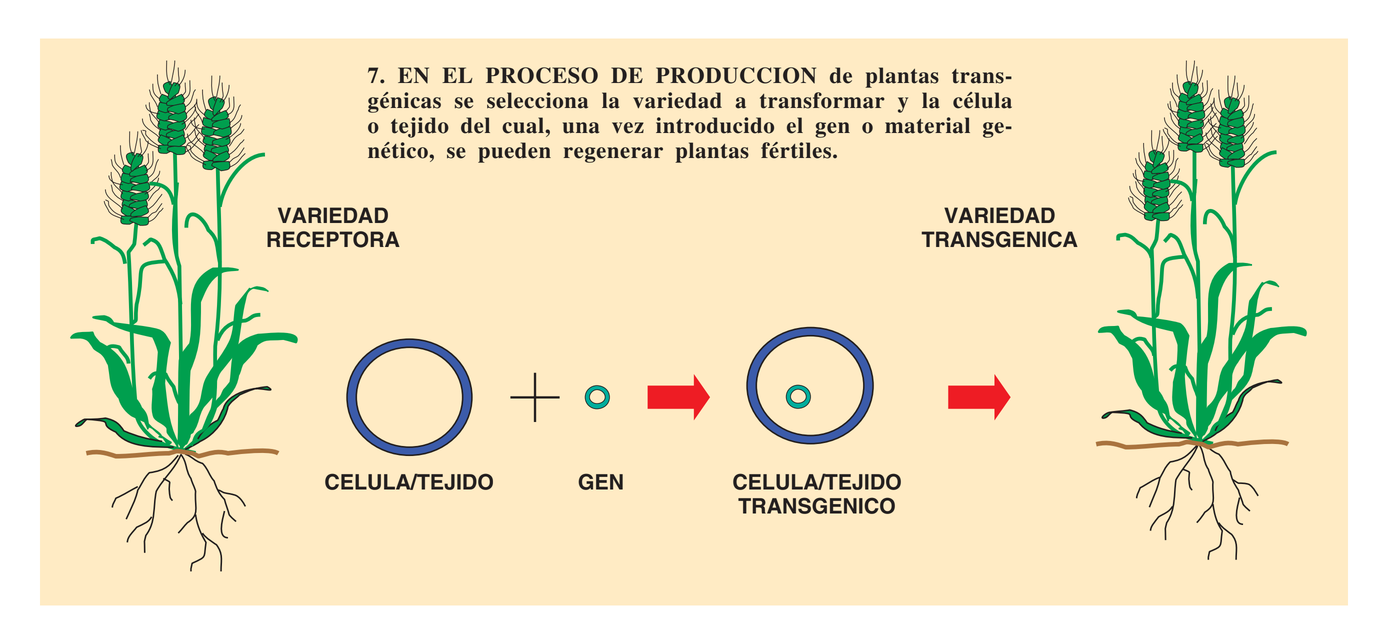
Ahora bien, la colaboración entre los equipos de Paul Lazzeri y Pilar Barceló, del IACR-Rothamsted, Peter Shewry, del IACR-Long Ashton, ambos en Inglaterra, y de Frank Bekes, del CSIRO australiano, consiguió trigo transgénico con los genes 1Dx5 y 1Ax1 introducidos mediante bombardeo de partículas de oro. Las plantas expresaban el gen hasta niveles estimados en un 400 % del nivel original y presentaban una elasticidad muy superior a los trigos normales.

El segundo ejemplo de la aplicación de técnicas de ingeniería genética en el trigo se refiere a la calidad del almidón, polisacárido del endospermo de cereales. Para su aplicación alimentaria se extrae de maíces mutantes o de variedades de patata, modificado luego mediante tratamiento químico. Para evitar ese paso químico y abrir el abanico de cultivos podría intentarse la transformación de especies distintas de la patata o el maíz con genes involucrados en la ruta biosintética del almidón. Varios laboratorios trabajan ya en la creación de variedades de trigo transgénicas capaces de generar tales almidones.

No podemos dejar de aludir a la posibilidad de modificar el valor nutritivo y terapéutico del trigo mediante el incremento de proteínas, aminoácidos y poliaminas, componentes importantes en la dieta humana y animal. Dentro de las poliaminas, la espermidina y la espermina resultan cruciales para el crecimiento y la proliferación celular, ya que intervienen en la síntesis de ADN, ARN y proteínas, además de ser mediadoras en la acción de ciertos factores de crecimiento y de hormonas. Aunque el trigo podría ser el cultivo ideal



6. EL CRUZAMIENTO DE TRIGO CON MAIZ constituye un método alternativo de obtención de plantas dobles haploides homocigóticas, independiente de la respuesta del genotipo al cultivo *in vitro* de anteras. El método consiste en la emasculación de las plantas de trigo y posterior polinización con maíz. Los embriones resultantes son haploides de trigo. El rescate y cultivo de los embriones inmaduros da lugar a plantas haploides que, tras la posterior duplicación cromosómica, origina plantas dobles haploides fértiles en las que se seleccionan los genotipos deseados.



7. EN EL PROCESO DE PRODUCCION de plantas transgénicas se selecciona la variedad a transformar y la célula o tejido del cual, una vez introducido el gen o material genético, se pueden regenerar plantas fértiles.

para desarrollar variedades con bajo y alto contenido en poliaminas ya que aporta el 50 % del total de poliaminas de origen vegetal ingeridas en la dieta humana, la ausencia de variabilidad para ese carácter impide su selección por mejora clásica.

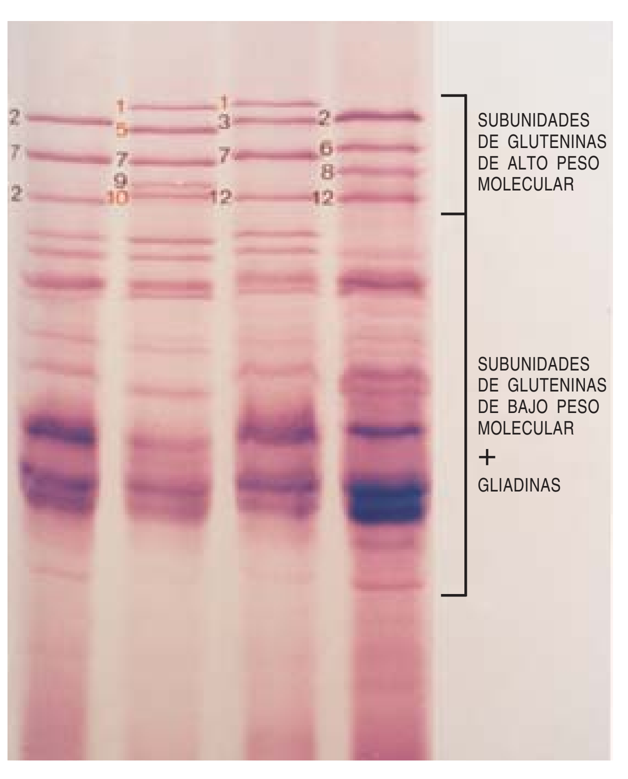
Por lo tanto, y dado que se han aislado la mayoría de los genes involucrados en la ruta metabólica de poliaminas, se puede recurrir a técnicas de ingeniería genética para intentar modificar los niveles de estos compuestos en el trigo. Los experimentos realizados en colaboración entre los equipos de Barceló-Lazzeri y Antonio Tiburcio, éste de la Universidad de Barcelona, están dando los primeros resultados prometedores. Eligieron el gen *adc* que determina la enzima arginina descarboxilasa, uno

SEMILLA
EMBRION
PLANTA DE TRIGO
EMBRIONES AISLADOS DE LA SEMILLA
EMBRIONES SEMBRADOS
EN MEDIO NUTRITIVO
EMBRIONES BOMBARDEADOS
CON PARTICULAS DE ORO
PORTADORAS DE ADN
INFECCION
CON *AGROBACTERIUM*
COCULTIVACION
CON *AGROBACTERIUM*
ADN PENETRA LAS CELULAS
REGENERACION DE PLANTULAS Y RAICES
PROCEDENTES DE EMBRIONES PORTADORES
DEL ADN TRANSGENICO,
BAJO CONDICIONES DE SELECCION
"trigo transgénico"
REGENERACION DE PLANTULAS Y RAICES
PROCEDENTES DE EMBRIONES PORTADORES
DEL ADN TRANSGENICO,
BAJO CONDICIONES DE SELECCION

8. LOS METODOS para la producción de plantas transgénicas en trigo son el bombardeo con partículas de oro (*izquierda*) y *Agrobacterium* (*derecha*). Ambos métodos utilizan como tejido diana los embriones inmaduros. En el método de bombardeo, se introduce el ADN en las células diana conducido por las partículas de oro aceleradas por la presión del gas helio. Con el método de *Agrobacterium* se introduce el ADN mediante la maquinaria de infección de la propia bacteria.

de los genes reguladores de la ruta metabólica de las poliaminas. Lograron su sobreexpresión en el endospermo de trigo transgénico, gracias a la acción de un promotor específico. Las líneas transgénicas mostraron aproximadamente el doble de contenido en espermidina y espermina que el genotipo original.

En el caso de reducción del nivel de poliaminas y de su efecto en el crecimiento y desarrollo de tumores, el equipo de Ian Pryme, de la Universidad de Bergen, ha logrado óptimos resultados con ratones. Tras inducirles tumores, a unos los alimentaron con una dieta baja en poliaminas y a otros con dieta normal; aquéllos terminaron por presentar una reducción significativa de la formación cancerosa.



9. GEL DE PROTEINAS de cuatro variedades de trigo. Se distinguen las subunidades de gluteninas de alto peso molecular y las de bajo peso molecular junto con las gliadinas. Los números simbolizan la subunidad. En rojo se indican las subunidades asociadas con buena calidad panadera y, en negro, las vinculadas con baja calidad.

Para incrementar el rendimiento de las variedades de trigo, la ingeniería genética cuenta con diversas opciones. Lo típico es pensar en multiplicar el número o el tamaño de las semillas, así como en reducir pérdidas causadas por plagas, enfermedades o entornos hostiles. Pero también podemos aumentar la cosecha mediante un transporte más eficiente de los asimilados o modificando las rutas metabólicas que determinan el rendimiento fotosintético.

Una tercera forma de conseguir mejor rendimiento es remodelando la arquitectura de la planta, es decir, reduciendo la componente vegetativa en favor de la productiva. La validez de esta estrategia ya quedó demostrada con los trigos semienanos, cuyo rendimiento se multiplicó mediante la modificación de la relación entre producción de grano y estructura vegetativa.

Para explicar el mecanismo de modificación de la arquitectura por ingeniería genética, nos ceñiremos a la transformación con genes codificadores de fitocromos. Se trata de proteínas directamente relacionadas con la fotosíntesis y, por tanto, fundamentales para el desarrollo de la planta. Cuando se sobreexpresa el fitocromo A, uno de los genes de la familia de dichas proteínas, la planta ignora el efecto de sombra de las plantas cercanas. Quiere ello decir que la planta no utiliza excesivos recursos en la elongación de los tallos, sino que los aplica al crecimiento de la superficie foliar y al desarrollo de las semillas, órganos de almacenamiento. Los equipos de Lazzeri, Barceló y Harry Smith, de la Universidad de Leicester, han logrado trigos transgénicos para el gen codificador del fitocromo A.

Se puede también incrementar el rendimiento del cultivo de trigo a través de la explotación del vigor debido a la heterosis de variedades híbridas. En efecto, por tratarse de una especie autógama, las variedades cultivadas del trigo son homocigóticas. La producción comercial de semilla híbrida (heterocigótica) requiere la esterilidad del gameto masculino en las líneas que servirán de parental femenino, para poder fecundarlas con el polen de las líneas utilizadas como parental masculino.

La esterilidad del gameto masculino se descubrió en los años cuarenta. Apareció un citoplasma capaz de inducir esterilidad del gameto masculino o grano de polen, a la vez que se hallaban genes nucleares que restablecían el poder fecundante del polen. Desde entonces se han venido desarrollando diferentes sistemas de inducción de esterilidad masculina, basados en la esterilidad citoplásmica, la nuclear o la promovida por sustancias gametocidas.

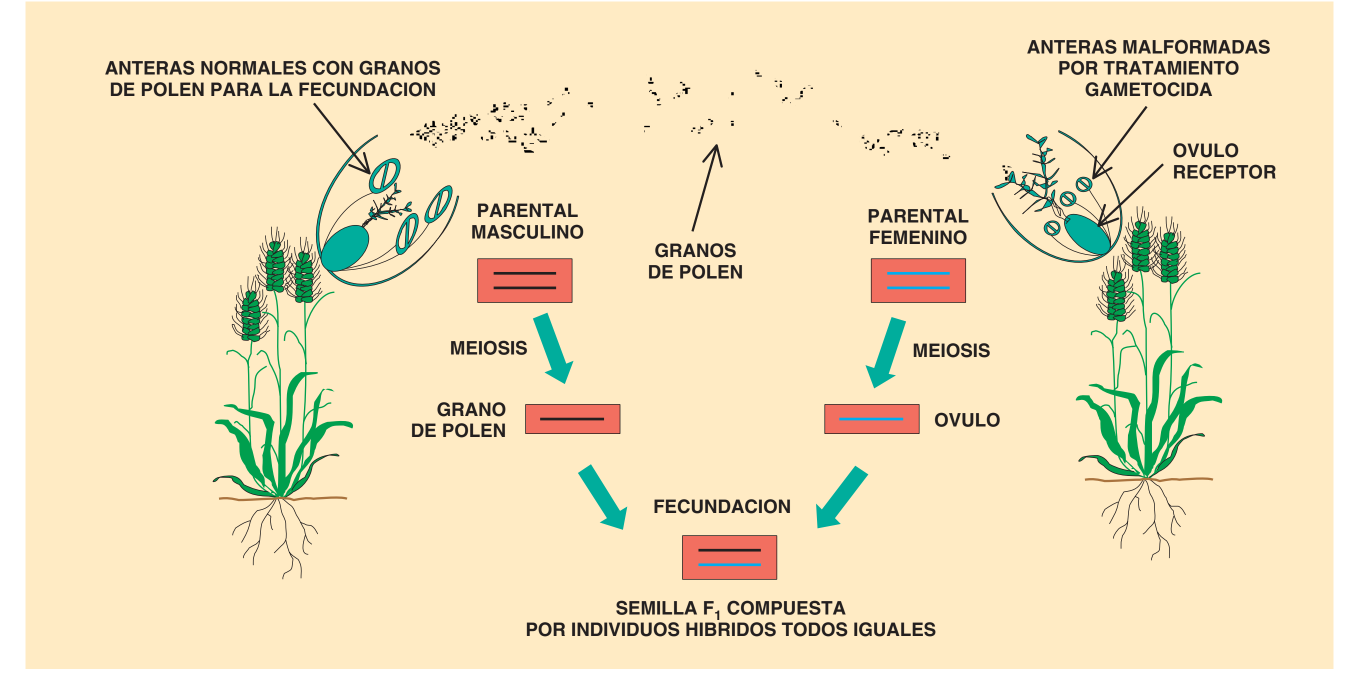
La producción de semilla híbrida presenta problemas relacionados con la restauración completa de la fecundidad, con la esterilidad parcial del gameto femenino o con la dependencia de las condiciones ambientales durante la polinización (dirección e intensidad del viento, humedad, lluvia y temperatura).

En la producción de híbridos por ingeniería genética trabaja el equipo de Marc De Block. Provocan la esterilidad del gameto masculino con la muerte prematura de las células del tapetum (células de las anteras responsables del desarrollo y nutrición de los granos de polen); ésta se consigue mediante la transformación con el gen *barnase*, cuya expresión va dirigida exclusivamente a las células del tapetum de la antera a través de la utilización de un promotor específico de dichas células (TA 29).

El gen *barnase* codifica para una ribonucleasa, enzima que destruye el tejido del tapetum, e interrumpe el desarrollo de los granos de polen creando esterilidad del gameto masculino. No se ha logrado aún la restauración de la fecundidad de estas plantas de trigo por ingeniería genética. Podría alcanzarse mediante la transformación con genes codificadores de cierto inhibidor del gen *barnase*. Nos referimos al gen *barstar*, cuya acción inhibidora se lleva a cabo mediante la formación de complejos integrados por la enzima ARNasa y el inhibidor de ésta.

Conjurar el espectro del hambre en una población mundial cada vez más numerosa constituye el gran desafío que aguarda al siglo XXI. Tendremos que conjugar el incremento de la producción de los cultivos con la reducción constante del suelo cultivable. La mejora genética de trigo deberá desenvolverse también con un uso restringido de abonos, de productos fitoquímicos y de riego.

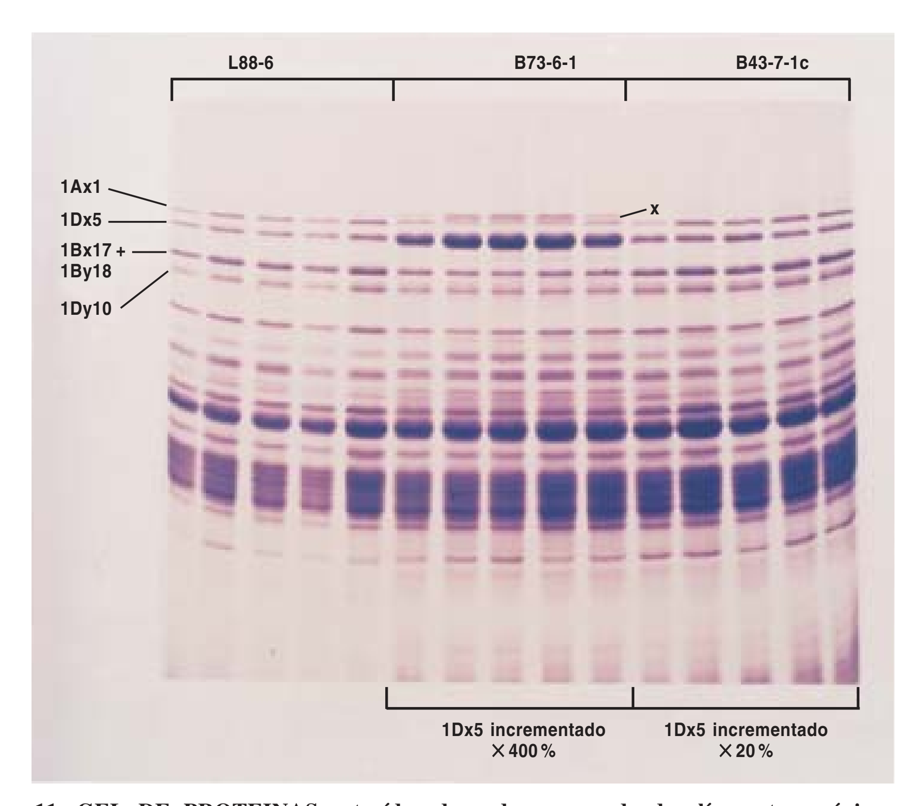
Un pilar fundamental de la mejora reside en las colecciones de recursos génicos. Ante el apremio de nuevos genes de resistencia, de calidad o de adaptación, se impone su iden-



10. LA PRODUCCION de semilla híbrida en trigo requiere la esterilidad del polen (gameto masculino) en el parental femenino para dejar así su fecundación al polen del parental masculino.

tificación entre los recursos existentes y transferirlos a las variedades objeto de mejora. La variabilidad genética es un requisito insustituible de este proceso ya que la selección no puede crear variabilidad, sino que actúa sobre las diferencias heredables existentes. La disponibilidad de mapas genéticos saturados resultará imprescindible para evaluar la variabilidad existente en las colecciones, para el seguimiento de su estabilidad genética y para el control de la introgresión de genes y de bloques génicos útiles en los programas de mejoras.

La transferencia de genes al trigo mediante ingeniería genética tendrá un papel fundamental en caracteres monogénicos, si bien de momento, y por largo tiempo, las técnicas clásicas de selección y de análisis cuantitativo permanecerán siendo el eje principal de la mejora del trigo para la mayoría de los caracteres de interés agronómico. Aunque la disponibilidad del mapa genético facilitará la manipulación genética, estamos lejos todavía de poder manipular bloques génicos complejos.



11. GEL DE PROTEINAS extraídas de endospermos de dos líneas transgénicas (B73-6-1 y B43-7-1c) y el genotipo control correspondiente a ambas líneas (L88-6). Las dos líneas están transformadas con el gen codificador de la proteína de alto peso molecular 1Dx5, ya existente en el genotipo control. Estas líneas muestran incrementos del nivel de expresión del 20 % (B43-7-1c) y el 400 % (B73-6-1).

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MOLECULAR AIDS FOR INTEGRATION OF ALIEN CHROMATIN THOUGH WIDE CROSSES. G. Fedak en *Genome*, vol. 42, n.º 4, págs. 584-591, 1999.

CHROMOSOME-MEDIATED AND DIRECT GENE TRANSFER IN WHEAT. P. P. Jauhar y R. N. Chibbar en *Genome*, vol. 42, n.º 4, págs. 570-583, 1999.

MOLECULAR IMPROVEMENT OF CEREAL CROPS. I. K. Vasil, en *Advances in cellular and molecular biology of plants*, vol. 5, Kluwer Academic Press 1999.

AGROBACTERIUM-BASED TRANSFORMATION OF CEREALS. Komari T. en *Advances in Botanical Research, Biotechnology in Cereals*, coordinado por P. Shewry y P. A. Lazzeri, Academic Press (en prensa).

CEREAL TRANSFORMATION BY DIRECT GENE TRANSFER. P. Barceló y P. A. Lazzeri, en *Advances in Botanical Research, Biotechnology in Cereals*, coordinado por P. Shewry y P. A. Lazzeri, Academic Press (en prensa).

TALLER Y LABORATORIO

Shawn Carlson

Dios los cría y ellos se juntan

Los etólogos se esfuerzan por comprender el comportamiento de los animales, en particular su conducta gregaria. Sabemos que un banco de peces y una bandada de pájaros se comportan en muchos aspectos todos a una. Pero el modo exacto por el que llegan a convertirse en una suerte de "superorganismo" sigue siendo un misterio.

Quizá la solución la aporte la informática. Son numerosos los programadores que están creando entornos virtuales poblados de animales digitales. La naturaleza de esas formas de vida artificiales suele depender de una cadena de datos especiales, análoga a la plantilla de ADN de un organismo vivo. El código digital define la interacción entre un organismo digital y su ciberentorno y determina la posibilidad de que la cibercriatura se reproduzca.

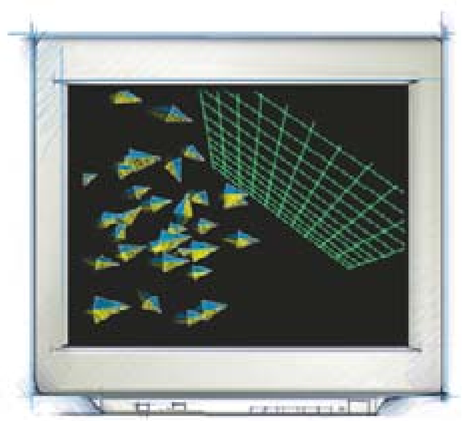
Para imitar al ADN real, el cibercódigo se programa para sufrir mutaciones aleatorias, capaces de alterar la salud del animal simulado. Así, rastreando muchas generaciones de esos animalitos de tamaño byte, en pocos minutos se puede observar la evolución de sus ADN digitales en unas pautas que a la naturaleza le costaría millones de años realizar con un código genético real. Con la cantidad de tal software disponible en línea (www.alife.org, o véase en www.aridolan.com/ad/adb/adib.html un índice de sitios de los que descargar documentos Java), todo aficionado interesado puede ya sondear en las honduras de la evolución… virtual.

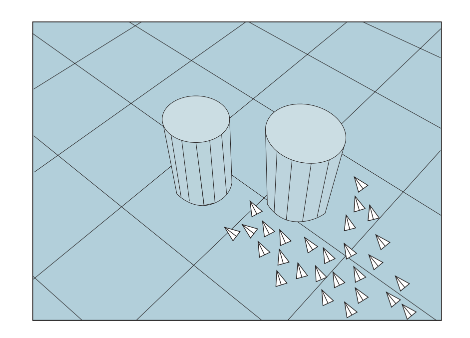
Craig Reynolds desarrolló en 1980 un impresionante modelo de bandada de pájaros. Conjeturó que cada individuo del grupo actuaba de acuerdo con un sencillo conjunto de directrices. Y programó sus creaciones de vida artificial. Tales "ciberpájaros" debían obedecer sólo tres reglas: no acercarse demasiado a los objetos, incluidos otros ciberpájaros; acompasar la propia velocidad a la de los ciberpájaros circundantes, y moverse siempre hacia el centro de la bandada más próxima.

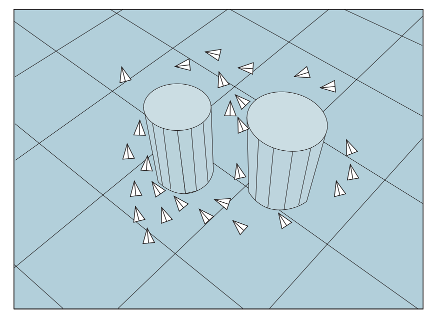
Los resultados de su simulación son extraordinarios. (En www.red3d.com/cwr/boids/ puede verse una burbujeante animación.) Cualquiera que sea la dispersión inicial de los ciberpájaros, éstos no tardan en formar una bandada. Cuando el grupo topa con un obstáculo en el ciberespacio, se disgrega en dos grupos y se reagrupa en el otro lado.

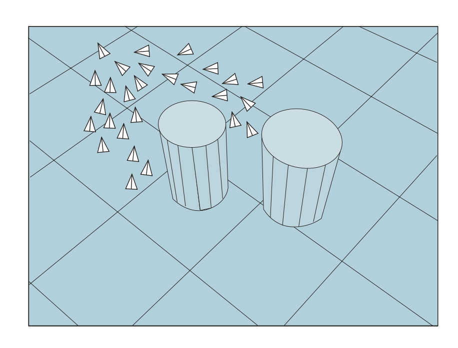
Las aves de Reynolds parecen respaldar la teoría de la conducta emergente, que describe la aparición de complejas interacciones sociales cuando los individuos obedecen unas pocas reglas rudimentarias pero muy especiales. El código de Reynolds no contiene referencia alguna a la formación de la bandada, ni instrucciones para que ésta sortee obstáculos. Sin embargo, en su simulación los ciberpájaros presentan un sorprendente conjunto de reacciones ante dificultades imprevistas. Reynolds, un adelantado en el terreno de lo virtual, recibió en 1998 un Oscar por sus aplicaciones de la animación por ordenador al cine.

Ariel Dolan, programador informático de Ramat-Gan (Israel), ha dado un giro delicioso a la creación de Reynolds desarrollando rapaces digitales. (La puerta al aviario artificial de Dolan está en www.aridolan.com/eFloys.html.) Estas rapaces siguen sólo dos reglas: ceñirse, aunque no demasiado, a la compañeras y, al localizar un intruso, volar hacia él y atacarlo. Instrucciones que generan también una bandada. Pero el conjunto es beneficioso para los individuos. Evitando el hacinamiento, los pájaros digitales se mueven en un grupo ralo sobre una zona extensa. De ese modo patrullan un espacio que se extiende mucho más allá del alcance sensorial de un in-









Los ciberpájaros pueden crearse en un ordenador (izquierda) *mediante un software desarrollado por Craig Reynolds. Aunque cada pájaro virtual obedece sólo a unas pocas reglas, cuando una bandada digital topa con un obstáculo* (abajo, izquierda), *los individuos se disgregan* (centro) *y luego se reúnen* (derecha), *imitando a una bandada real*

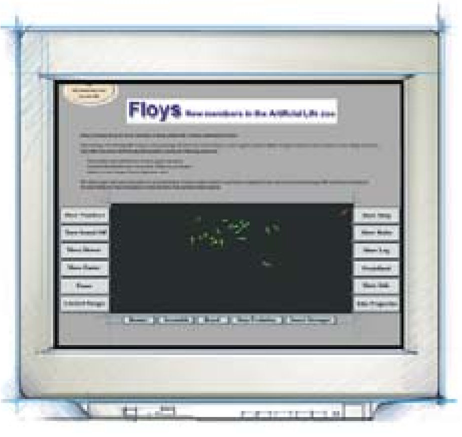
dividuo. Siempre que un extraño se acerca, la rapaz más cercana se mueve hacia él. Y como sus congéneres están programados para permanecer juntos, sus vecinos le siguen, al igual que sus compañeros de escuadrilla, y así sucesivamente.

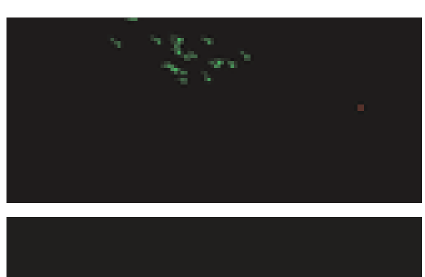
Retada por un enemigo, la bandada entera vira rápidamente y se lanza a perseguir al intruso, incluidos los individuos que inicialmente se hallaban demasiado lejos para percibir la presencia del extraño. El grupo no tarda en rodear al invasor, que muere luchando por su vida artificial. La escena no difiere de lo que le ocurriría a un desventurado carabao que inadvertido se adentrase en un lago infestado de pirañas.

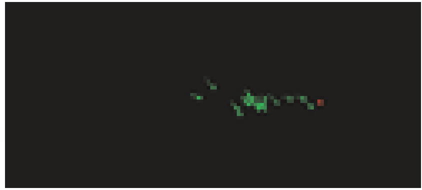
Cual las pirañas en su festín, cada rapaz es recompensada por cada "picotazo" certero. En ese mundo de ciberpájaro-come-ciberpájaro de Dolan, cada bocado traspasa una unidad de energía de la presa al depredador. Las rapaces más veloces tienen mayor oportunidad de hartarse, pero consumen rápidamente su energía en el vuelo. Las más lentas gastan menos energía, pero suelen también alcanzar más tarde a los intrusos y por ello consiguen menos alimento.

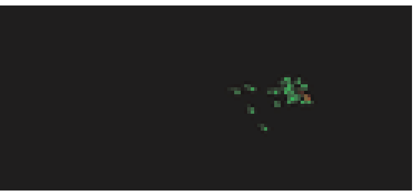
El código de Dolan genera mutaciones en las instrucciones sobre la velocidad y el consumo de energía, así como en otros parámetros, incluidos el modo en que los individuos se aproximan unos a otros, su aceleración y la posibilidad de que infrinjan las reglas. El programa de Dolan asegura también que las rapaces más energéticas sean las que más probablemente se reproduzcan y transmitan sus caracteres. Conforme pasan las cibergeneraciones, la población se adapta cada vez más a vivir en su reino virtual.

Armado con el código de Dolan y un poco de imaginación, cualquiera con unas habilidades modestas para la programación puede efectuar toda clase de investigaciones originales. En mi caso, trato de averiguar por qué subsisten unos altos niveles de agresividad en las poblaciones, siendo así que esa tendencia parece suicida. En mi versión se enfrentan dos bandas de rapaces digitales. Una pierde energía con el picotazo de otra enemiga, pero los vencedores no adquieren energía al agredir a un contrario. El resultado es una confusa refriega en la que el vencedor está por completo determinado por los números, las reservas de energía y las reglas de la probabilidad.











El Java Applet permite a los navegantes de la Web interesados simular ciberrapaces ("Floys", arriba). *Una secuencia de instantáneas* (de arriba abajo, derecha) *muestra lo que ocurre cuando una bandada de rapaces digitales* (en verde) *detecta a un invasor solitario* (en rojo) *y lo acorrala mientras el intruso, acosado, trata de huir*

Proyecto modificar el código para abarcar rapaces con tres niveles diferentes de hostilidad innata. Cuando una recibe un cibergén de agresividad de cada progenitor, resultará especialmente agresiva y luchará hasta la muerte con todos los extraños. Un individuo que herede un solo gen de agresividad batallará hasta que sus reservas de energía empiecen a escasear y entonces se retirará. Y un individuo sin genes de agresividad se inhibirá siempre.

Pienso que ocurrirá lo siguiente. Cuando la población dé con un grupo enemigo de fuerza abrumadora, sólo algunos miembros presentarán batalla, mientras que los no agresivos se retirarán. Cuando al fin las reservas de energía escaseen, las rapaces de mediana agresividad se unirán a sus camaradas pacíficas. Pero las más agresivas seguirán enzarzadas con el enemigo, protegiendo a sus compañeras en retirada. Aunque tan infatigables guerreros acabarán muertos, sobrevivirá la mayor parte de la población; lo cual no está mal, ya que una población uniformemente agresiva terminaría exterminada. Y dado que los individuos hiperagresivos aparecerán en la generación siguiente, cuando se apareen rapaces con un único gen de agresividad, esa estrategia puede continuar indefinidamente. Resulta así que algunos individuos de una población en guerra puede que siempre posean tendencias destructivamente agresivas; pero ello no para su propia protección, sino para asegurar la supervivencia de sus hermanos pacifistas.

Podemos recurrir a la vida digital para solucionar problemas que nada tienen que ver con la biología. Los de tráfico, por ejemplo (www.theo2.physik.uni.stuttgart.de/treiber/MicroApplet/). Greg Schmidt opina que no habría que modificar mucho las ciberrapaces de Dolan para conseguir un modelo de la conducción por autopistas interurbanas. Al igual que en mi versión, las acciones de cada rapaz podrían estar en parte determinadas por un parámetro de agresividad, que haría a ciertos individuos más proclives a la velocidad, ceder el paso a otros o conducir por el arcén durante los atascos. Tal modelo, inspirado en un modelo de pájaros, podría brindar ideas importantes acerca de la gestión del tráfico. En última instancia, podría alguno explicar por qué los automovilistas tendentes a los malos modos durante las horas puntas parecen siempre tan abundantes como los cuervos.

Para más información acerca de este y otros proyectos, eche un vistazo a la página Web de la Society for Amateur Scientists, www.sas.org y haga clic en el botón "Forum". Se puede escribir a la sociedad a su nueva dirección, 5600 Post Rd.#114-341, East Greenwich, RI 02818, o llamar sin cargo a 877-527.03.82.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Ian Stewart

Limo espiral

El verano pasado asistí en Portugal a un congreso sobre matemática de la formación de patrones. Una de las ponencias me hizo pensar en el segundo de mis animales favoritos. El primero es el tigre, con su impresionante pelaje a rayas. También es el segundo por su diseño mi preferido, aunque nada tenga esta criatura de la elegancia del felino. Se trata del moho del cieno o légamo, en concreto la especie de moho *Dictyostelium discoideum*.

A los biólogos, el moho del légamo les resulta fascinante porque yace en la divisoria entre en los protozoos unicelulares y los organismos multicelulares. El moho del légamo sirve también de ilustración de una verdad biológica que los exploradores del genoma humano deberían grabar en su memoria: lo que importa no son tus genes, sino lo que haces con ellos. A pesar de su humilde posición en el árbol de la vida, *Dictyostelium* se las arregla para crear motivos espirales de una belleza asombrosa. ¿Hasta qué punto se encuentran estos motivos codificados en sus genes? ¿Existe el gen de las espirales?

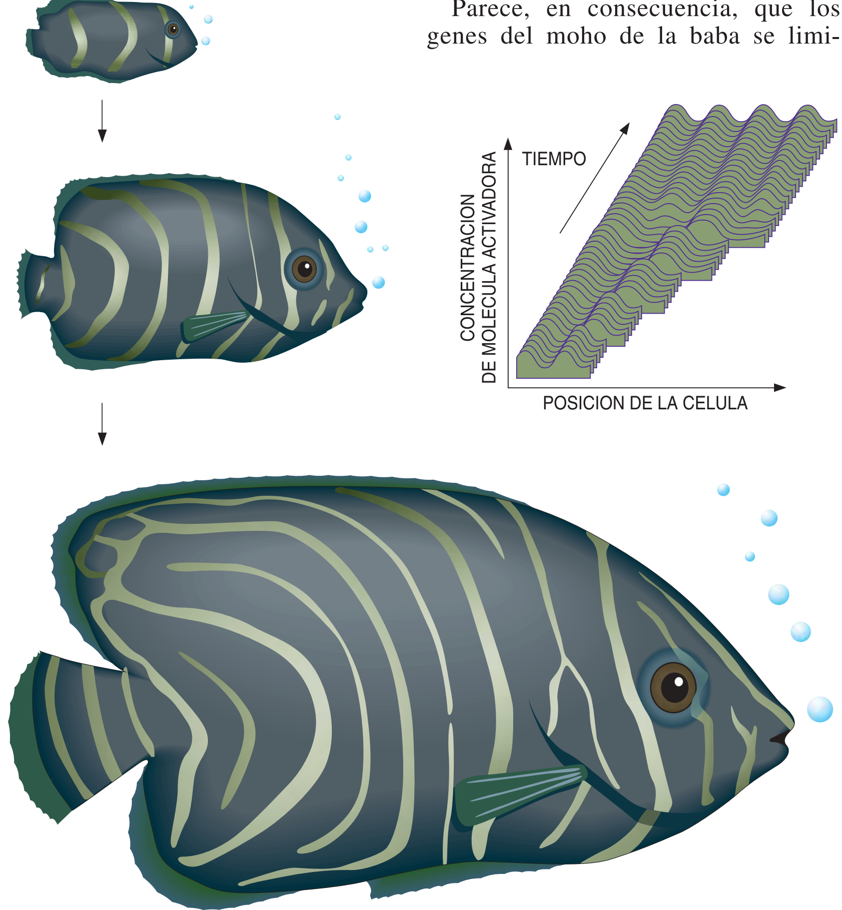
Para responder a esta cuestión, precisamos conocer de qué forma construye el moho sus espirales. Tal motivo es, en realidad, fruto de la actividad colectiva. El ciclo vital de *Dictyostelium* empieza con una espora microscópica a merced del viento. Si la espora tiene la fortuna de aterrizar en un lugar idóneo, un lugar húmedo donde reposar, germina y crea una ameba unicelular, que comienza a cazar en busca de alimento (bacterias, sobre todo.) Cuando la ameba adquiere tamaño suficiente, se reproduce por partición. Pronto habrá una gran cantidad de amebas.

Cuando la comida escasea, empieza el arte. Las amebas se apiñan, y al ir avanzando hacia el centro de la piña, dibujan una espiral. La multitud de amebas va gradualmente haciéndose más densa y la espiral, más prieta. En cierto punto se escinde en "pautas de corriente", sugestivas de ramas o raíces que se extienden desde el centro. Las corrientes se espesan, y siendo cada vez más las amebas que intentan llegar al mismo sitio, se amontonan formando una prominencia conocida por "babosa" (que nada tiene que ver con el molusco del mismo nombre).

Aunque la babosa es una colonia de amebas, se mueve como si de un solo organismo se tratase. En cuanto llega a un sitio seco, se ancla en el suelo y emite un largo tallo. En la extremidad del tallo aparece un glóbulo redondo, un cuerpo fructífero. Las amebas del cuerpo fructífero se convierten en esporas y son dispersadas por el viento, prosiguiendo así el ciclo.

Thomas Höfer ha descubierto un sencillo sistema de ecuaciones matemáticas que reproduce las espirales del moho y sus patrones de corriente. Cornelis J. Weijer ha hecho ver que otras ecuaciones muy parecidas permiten modelizar el movimiento de la babosa. Los principales factores determinantes de los patrones o configuraciones son la densidad de población de las amebas, la tasa con que las amebas producen un compuesto químico conocido por AMP cíclico y la sensibilidad de las amebas a este compuesto. Cada ameba "le grita" su presencia a las vecinas enviando AMP cíclico. Las amebas se encaminan entonces en la dirección en la que los gritos son más fuertes. La disposición espiral es consecuencia matemática de este proceso. Se forma cuando las amebas que ocupan el centro del montón están girando al tiempo que envían ondas de AMP cíclico.

Parece, en consecuencia, que los genes del moho de la baba se limi-



1. El angelote va desarrollando nuevos motivos listados mientras madura. En una simulación computarizada del proceso (arriba, a la derecha) *las crestas de las ondas corresponden a las listas*

tan a decirle cómo ser una ameba. Los genes les indican a las células cómo deben enviar señales químicas, cómo percibirlas y de qué forma responder a ellas; pero las configuraciones espirales que producen no están especificadas en los genes. Tales pautas resultan de las reglas matemáticas obedecidas por las amebas. Puede que las matemáticas definan el ciclo vital del moho de la baba en tanta medida como la genética.

Las ecuaciones que conducen a esta conclusión tan controvertida como rica en consecuencias son modificaciones de otras ideadas hace 50 años por Alan Turing, más conocido por contarse entre los fundadores de las ciencias de computación. Turing se interesaba también por la morfogénesis, esto es, por la formación y diferenciación de los tejidos y órganos. En 1952 postuló que las configuraciones ordenadas de los seres vivos no exigen un precursor ordenado. Atribuía tales patrones a sustancias químicas "morfógenas", que reaccionan entre sí al tiempo que se difunden a través de los tejidos.

Turing se movía en el terreno de la teoría. Pero no se hizo esperar un llamativo ejemplo de "patrones de Turing": la reacción química BZ (Belousov-Zhabotinsky). B. P. Belousov y, más tarde, A. M. Zhabotinsky descubrieron que bastaba mezclar unos cuantos compuestos químicos —entre ellos, bromato sódico, ácido sulfúrico y ácido malónico— en un disco de petri para que se produjeran anillos concéntricos y espirales muy parecidas a las del moho del légamo. Otras reacciones similares engendran franjas, lunares, moteados y otros motivos frecuentes en el mundo animal.

Sin embargo, los biólogos rechazaron las ideas de Turing. Uno de los grandes problemas de su tesis es que las configuraciones que surgen espontáneamente en la reacción BZ no permanecen fijas, sino que se mueven a través del disco de petri. Y otro tanto vale para las demás configuraciones de Turing observadas por los químicos. En cambio, en casi todos los seres vivos tales motivos son fijos. No vemos cebras con listas móviles ni leopardos con manchas desplazables. Turing había demostrado que sus ecuaciones podían producir tanto configuraciones móviles como estacionarias, pero los experimentos de laboratorio parecían producir sólo las móviles. Los químicos descubrieron más tarde el porqué: si las reacciones se realizan en un gel, en lugar de hacerlo en un líquido, las



2. Las artísticas amebas de una colonia de moho del légamo forman espirales como las de este dibujo

configuraciones se vuelven estacionarias. Los organismos se asemejan más a los geles que a los líquidos. Mas para cuando esta diferencia resultó clara, los biólogos habían perdido interés en el debate.

Los matemáticos, no obstante, siguieron reflexionando en las ideas de Turing. Aunque sus ecuaciones eran demasiado simples para modelizar fenómenos biológicos, sí producían el mismo tipo de motivos observables en animales. Si los pigmentos se depositan de acuerdo con las crestas y senos de ondas paralelas, se obtienen listas. Otras ondas más complejas producen manchas. El problema consistía en encarnar el esquema de Turing en modelos teoréticos que remedasen más de cerca las obras de la biología.

En 1995 se hallaron las primeras pruebas convincentes de la existencia de configuraciones de Turing en seres vivos. Shigeru Kondo y Rihito Asai observaron durante varios meses el crecimiento de unos peces llamados angelotes y advirtieron una reorganización gradual de sus listas. En los mamíferos, los motivos de la piel se limitan a aumentar conforme va creciendo el animal, pero en los angelotes en maduración se van formando sin cesar nuevas listas por división en dos de las antiguas. Y lo que es más: el cambio es predecible mediante ecuaciones matemáticas muy parecidas a las de Turing. Una simulación computarizada de las interacciones moleculares en una formación unidimensional de células generó un patrón de ondas que encajaba muy de cerca con la reorganización de las listas de los angelotes.

El desplazamiento de las listas es bastante lento, por lo que normalmente no lo apreciamos. Las matemáticas modifican el aspecto del angelote, lo mismo que influyen en el ciclo vital del moho del limo y, posiblemente, también en el nuestro.

Acuse de recibo

En el artículo de julio ["Mosaicos iterativos no periódicos"], afirmaba que no han sido clasificadas todas las "repteselas" posibles (es decir, las losetas que, ensambladas, crean réplicas de sí mismas a mayor escala). Aaron Meyerowitz me objeta que seguramente se trate de un problema difícil en el sentido de complejidad algorítmica, es decir, del tiempo que habría de estar funcionando un ordenador para resolverlo.

Limitémonos a los poliominós, que son polígonos formados adosando cuadrados por sus lados. Se sabe que el problema de determinar si un conjunto dado de poliominós puede teselar un rectángulo es inabordable. Cualquier algoritmo que se utilizase para resolver el problema tardaría un tiempo desmesuradamente grande en dar una solución. Es probable que otro tanto valga para el problema de determinar si un único poliominó puede pavimentar un rectángulo. Sabemos, además, que cualquier poliominó que tesele un rectángulo es una reptesela, pues siempre se puede hacer que los rectángulos llenen un cuadrado, y después, adosando copias del cuadrado, reproducir la forma del poliominó original. Resulta plausible, pues, que la clasificación de los poliominós repteselas sea una tarea imposible.

Rebecca Lipsitz

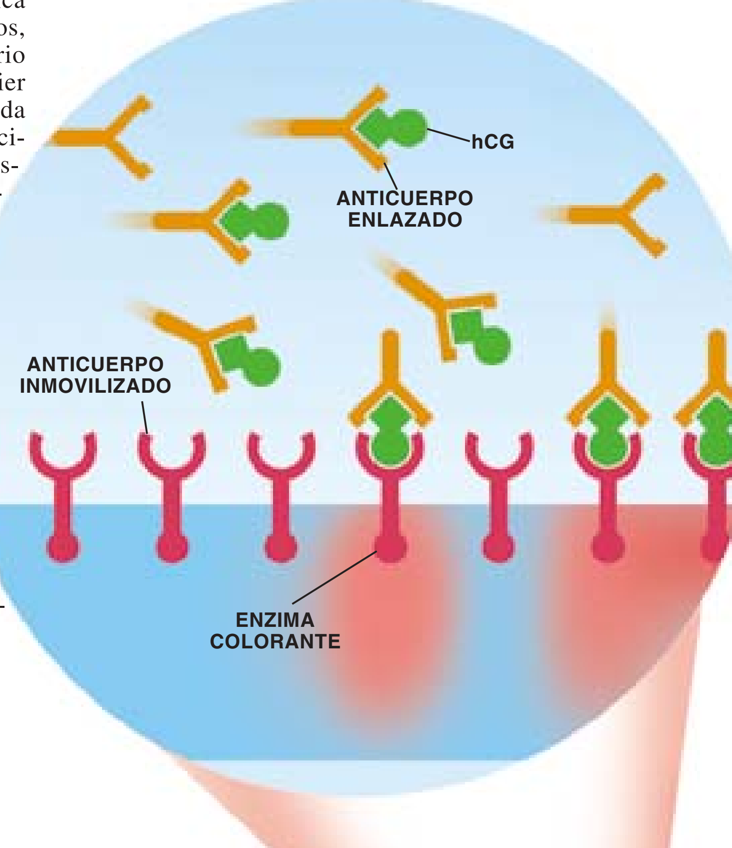
Tests del embarazo

El diagnóstico médico a domicilio se remonta a principios del siglo XVIII y a la invención del termómetro de cápsula de vidrio graduada. Pero el ingenio humano no ha cejado en la invención de otros procedimientos para descubrir diferentes estados de salud. Desde finales de los años setenta el mercado de tales artificios ha florecido, tras la aprobación por las autoridades sanitarias de la prueba casera del embarazo.

En la prueba del embarazo se comprueba la existencia, en la orina de la mujer, de gonadotropina coriónica humana (hCG), hormona segregada por la placenta tras la fecundación del óvulo. Su concentración en sangre se dobla cada dos o tres días, alcanzando un máximo a unas ocho semanas del embarazo. La técnica subyacente a esta prueba se basa en los anticuerpos, proteínas ipsiliformes que nuestro sistema inmunitario despliega contra virus y bacterias invasores o cualquier otro cuerpo reputado extraño por el organismo. Cada anticuerpo se ancla fuertemente y con gran especificidad en las moléculas ajenas, los antígenos, y esa especificidad sirve de guía para las defensas inmunitarias.

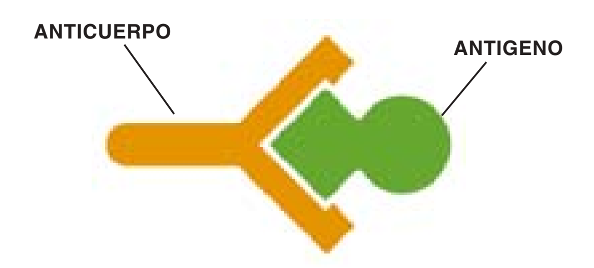
En las pruebas de embarazo se emplea una combinación de tres tipos diferentes de anticuerpos, dos procedentes de ratones y uno de cabras; los dos primeros se enlazan con la hCG. Al fondo de una varilla de prueba se aplica una muestra de orina. Los primeros anticuerpos se desplazan varilla arriba en cuanto entran en contacto con la muestra de orina, prendidos de toda molécula de hCG presente. Los segundos anticuerpos están anclados al área de prueba de la banda e inmovilizan la hCG (junto con los anticuerpos combinados con ella). El resto de los primeros anticuerpos carentes de hCG prosiguen hacia la zona de control, donde son asidos por el tercer tipo de anticuerpo. (Esto sirve para verificar que el primer anticuerpo trepó correctamente por la varilla.)

Las moléculas de hCG y los anticuerpos son diminutos e incoloros, por lo que de suyo se detectarían difícilmente. Pero los primeros anticuerpos anti-hCG portan también una enzima que colorea una sustancia incolora que baña las regiones de prueba y de control. Según donde vaya a parar el primer anticuerpo, el realizador de la prueba verá una línea coloreada sólo en la región de control (no hay embarazo) o una línea coloreada tanto en la región de control como en la de prueba (hay embarazo).

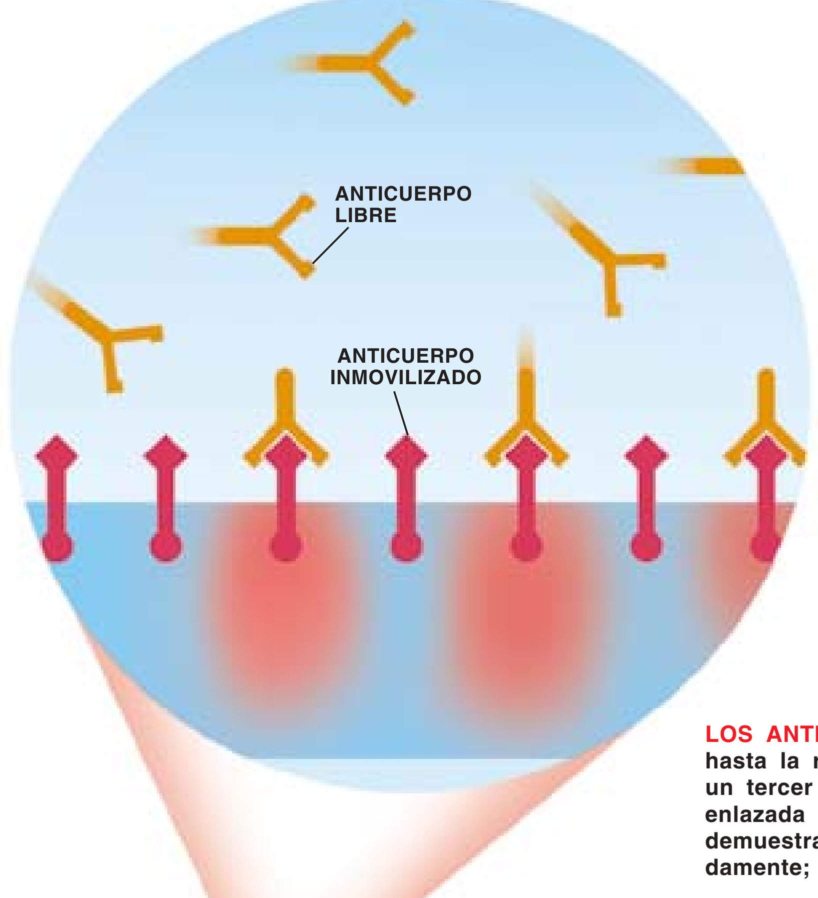


LA MUESTRA DE ORINA se aplica al fondo de la varilla. Toda la hCG presente se enlaza con el primer anticuerpo anti-hCG. Por capilaridad ascienden varilla arriba los anticuerpos enlazados y los libres.

LA REGION DE LA PRUEBA contiene anticuerpos anti-hCG inmovilizados. Estos se ligan a otros lugares de la hCG, atrapando el “sandwich” y fijándolo al lugar. Una enzima enlazada con el primer anticuerpo cambia el color de un baño que lleva la varilla, lo que indica prueba positiva.



LOS ANTICUERPOS, proteínas protectoras generadas por el sistema inmunitario, son similares en tamaño general, pero contienen leves variaciones que les permiten reconocer y atrapar diferentes antígenos (sustancias extrañas). En las pruebas de embarazo se emplean anticuerpos extraídos de ratones.



LOS ANTICUERPOS LIBRES avanzan varilla arriba hasta la región de control, donde se combinan con un tercer tipo de anticuerpo. Aquí también la enzima enlazada causa un cambio de color, pero ello sólo demuestra que los anticuerpos se comportan adecuadamente; no indica embarazo.

¿Sabía usted que...?

- Una de las características por las que se distinguen las pruebas de embarazo es la celeridad con que pueden detectar la fecundación del óvulo. Esto depende directamente de los niveles umbrales mínimos de hCG necesarios para que la prueba dé positivo. Muchos fabricantes afirman que sus pruebas detectan hCG en una concentración de 25 miliunidades internacionales por mililitro, que aparece unos diez días después de la fecundación. Los resultados falsos negativos suelen darse cuando los niveles de hCG están por debajo de los límites de detección de la prueba. Los resultados falsos positivos pueden darse a veces en mujeres que hayan recibido hCG como parte de un programa de tratamiento de la infertilidad.

- Existen más de 100 pruebas de embarazo distintas autorizadas. Su fiabilidad las ha convertido en los protocolos de diagnóstico casero más extendidos.

- En 1999, las ventas de protocolos para la prueba de embarazo ascendieron, sólo en Estados Unidos, a 230 millones de dólares, lo que corresponde a unos 19 millones de pruebas.

- Aunque los tests de embarazo dominan el mercado de las pruebas caseras, hay otros protocolos de utilización doméstica que permiten controlar la concentración de glucosa (de interés para los diabéticos), la ovulación, el colesterol y los anabolizantes.

NEXOS

James Burke

Pervivencia



Anoche, sazonando la cena, derramé sal. Me la tiré sin querer por encima del hombro izquierdo. Y, buscando razones de mi torpeza, me acordé del explorador victoriano Edward Burnett Tylor, que identificó ese tipo de costumbres: la pervivencia carente de sentido de viejas prácticas que una vez lo tuvieron. Tylor ("padre de la antropología cultural") fue quien encontró el nexo entre Little Red Riding Hood y los mitos solares y se planteó una duda aún rabiosamente candente, a saber, si las técnicas primigenias pasaron de una cultura a otra o si convergieron varias culturas en la invención de las mismas.

Inició su trabajo tras una visita a La Habana en 1856, donde coincidió con Henry Christy, hijo viajero de un banquero, adinerado y aficionado a la etnología. Juntos se trasladaron a México. Allí Tylor tomó algunas notas para su primer libro de antropología, *Anahuac*, mientras Christy llenaba sus baúles con toda la quincallería que se suele traer de un viaje de vacaciones: máscaras, muñecas, cestas de mimbre y demás. Christy ejercía de ave rapaz doquiera ponía pie. En la francesa Perigord, sin ir más lejos. Andando el tiempo, en ese rincón de Europa financió y acompañó a Édouard Lartet ("el padre de la paleontología") en sus exploraciones de cuevas del Paleolítico Superior que revelaron algunos de los primeros ejemplos de arte rupestre. Christy rebanó algunos de ellos y se los llevó a Inglaterra para añadirlos a su soberbia colección de botines prehistóricos, que en 1865 donaría al Museo Británico, en las tiernas manos del guardián de la etnografía, Augustus Wollaston Franks. El coleccionista de coleccionistas.

Además de amontonar cosas para sí mismo (mayólica de Italia, porcelana china y japonesa, katanas japonesas, inscripciones medievales, copas y anillos de la antigüedad clásica), Franks era una fiera a la hora de separar lo rico y viejo de la morralla en beneficio del museo. Así se trabajó el tesoro familiar Fountaine, reunido 100 años antes por Sir Andrew de la Fountaine, tutor de la familia real inglesa, sucesor de Newton en la Casa de la Moneda, compañero de Gottfried Leibniz y extraordinario experto en antigüedades clásicas. En 1714 Sir Andrew emprendió un viaje por Italia, comprando pasado en grandes cantidades (monedas, pinturas, libros y cerámica) y haciéndose íntimo de Cosimo III de Medici, penúltimo gran duque de la Toscana, mientras el lugar y la familia se arruinaban. Todavía en los tiempos del padre de Cosimo, Ferdinando II, residían en el palacio de los Medici intelectuales de la talla de Galileo y su adláter Evangelista Torricelli, que sólo descubrió el vacío.

A Torricelli se le conoce menos por su trabajo en galimatías como la geometría de los indivisibles. El lector habitual de esta sección recordará que es una de mis numerosas lagunas, así que me conformaré con afirmar que Torricelli facilitó el cálculo del volumen de los toneles. O al menos eso creo.

De hecho había mucha más miga ahí de lo que parece, como quedó reflejado cuando las notas de Torricelli sobre infinitesimales despertaron el interés del matemático inglés John Wallis. Un tipo despierto que a los quince años sabía griego, latín y francés, y que se convirtió en criptólogo oficial; introdujo el símbolo de ∞, participó en la fundación de la Regia Sociedad con su amigo Robert Boyle y extendió el trabajo de Torricelli hasta dejarlo listo para que Newton desarrollara el cálculo. Todo ello sin descuidar las labores propias de un sacerdote, como echar sermones y escribir tratados morales. En 1791 un predicador calvinista, Charles de Coetlogon, se encargó de editar y publicar las homilías puritanas de Wallis. El plato fuerte de De Coetlogon eran sus prólogos a los gruesos tomos de otros, el equivalente dieciochesco del clásico reclamo "¡Léalo! ¡Un auténtico éxito de ventas!"

Hacia 1770 de Coetlogon auxiliaba, en la capellanía del hospital Lock de Londres, al reverendo Martin Madan. Era éste un pecador arrepentido. Madan formaba parte, en 1748, de una cuadrilla juvenil de camorristas que acudía a los sermones de John Wesley con el fin de recoger material para sus sátiras de sobremesa. Pero las palabras del predicador hicieron otro tipo de mella y Madan ingresó en el seminario. En 1780 el dómine emborronó literalmente las galeradas de un libro con un decantado trabajo sobre cómo la Biblia aprobaba la poligamia y ésta podía solucionar los problemas del adulterio, estupro y prostitución. Nada menos.

Mientras tanto, la enésima edición actualizada del manual de primeros auxilios de Wesley, *Primitive Physic*, arrasaba en las librerías con un capítulo adicional sobre las sorprendentes propiedades curativas de la nueva electricidad. Muy de moda por entonces, gracias a iniciativas promotoras como la del "Dr." James Graham y su "Templo londinense de la salud y Hymen", donde los hipocondríacos guardaban cola para

sentarse en un “trono electromagnético” y recibir tratamiento de choque para todas las patologías, desde el acné hasta el desmejoramiento. En cierta ocasión Graham compartió estancia con una mujer enorme, una tal Ann Siddons, que bizqueaba, y que más tarde intentaría suicidarse de forma muy pública en la Abadía de Westminster y cuya hermana le pagaría una pensión con la condición de que se mantuviera alejada no menos de 250 kilómetros.

La hermana era Sarah Siddons, estrella y reina de la tragedia del teatro del siglo XVIII, que haría todos los papeles principales de todas las obras de Shakespeare, con un éxito mayúsculo. Se ganó además un sobresueldo con lecciones de oratoria a las damas de la realeza.

En su versión de 1801 de *El rey Juan*, el papel del adolescente príncipe Arturo lo ejecutaba un recién llegado de catorce años, Edmund Kean, quien recibió clases de declamación de su tío ventrílocuo y quien tuvo una carrera paralela a la de Siddons; ganó tanto dinero, que lo apilaba en el suelo de su apartamento. Kean terminó por creerse su propio exceso, se convirtió en el villano de todos los melodramas, fue elegido jefe honorario de los Hurones y murió víctima de su apego al alcohol. Su hijo Charlie se valió del apellido para hacer carrera como empresario teatral de moderado éxito.

A Torricelli se le conoce menos por su trabajo en galimatías como la geometría de los indivisibles

En 1858 contrató a una niña de once años para el papel de príncipe Arturo. Enamoraría a Henry Irving y ganaría fama mundial como Ellen Terry, con más años representando a Shakespeare que la propia Siddons.

En 1905, en el final de su carrera, Terry protagonizó *Alice Sit-by-the-Fire*, especialmente escrita para ella por un recién llegado al mundo del drama, J. M. Barrie, que acababa de cerrar lo que sus amigos consideraban un auténtico desastre por el que nadie querría pagar una entrada: una obrita menor para niños, de título *Peter Pan*. La lista de obras de Barrie es más larga que mi brazo, muchas yacen olvidadas, incluido su único fracaso: *Jane Annie*, escrita en colaboración con un tipo que tres años antes había ejercido de médico y que un año después sería conocido en todas las casas como el creador del detective más famoso de todos los tiempos, Arthur Conan Doyle. Sherlock Holmes despertó tal afición, que hoy se cuentan por miles los que visitan su “casa” (ahora museo) en Baker Street, Londres, donde “vivía” con su inseparable Dr. Watson.

Años más tarde Doyle creó otro triunfador: el profesor Challenger, explorador, antropólogo y protagonista de *El mundo perdido*, que encuentra una misteriosa meseta aislada en la jungla suramericana, habitada por animales prehistóricos y eslabones perdidos “medio hombre-medio mono”.

Pervivencias de lo arcaico, tal como propondría el trabajo del antropólogo E. B. Tylor. ¿Me alcanza la sal, por favor?

Revolución Científica

Masa crítica

RETHINKING THE SCIENTIFIC REVOLUTION. Dirigido por Margaret J. Osler. Cambridge University Press; Cambridge, 2000. **NICOLAUS COPERNICUS GESAMTAUSGABE: OPERA MINORA.** Edición, introducción y traducción de Stefan Kirschner y Andreas Kühne. Akademie Verlag; Berlín, 1999.

GIORDANO BRUNO. OPERE ITALIANE. Edición preparada por Eugenio Canone. Leo S. Olschki Editore; Florencia, 1999. **GIORDANO BRUNO AND RENAISSANCE SCIENCE,** por Hilary Gatti. Cornell University Press; Ithaca, 1999.

ARCHIVES OF THE SCIENTIFIC REVOLUTION. THE FORMATION AND EXCHANGE OF IDEAS IN SEVENTEENTH-CENTURY EUROPE. Dirigido por Michael Hunter. The Boydell Press; Woodbridge, 1998. **STUDIES IN SEVENTEENTH-CENTURY EUROPEAN PHILOSOPHY.** Dirigido por M. A. Stewart. Clarendon Press; Oxford, 1997.

LA CHIMIE DE NICOLAS LEMERY, por Michel Bougard. Brepols Publishers; Turnhout, 1999. **GIORGIO BAGLIVI. CARTEGGIO (1679-1704).** Edición preparada por Anna Toscano. Leo S. Olschki Editore. Florencia, 1999.

Toda periodización de la historia resulta, por arbitraria, polémica. No es la historia de la ciencia ninguna excepción. Y así el intervalo temporal que solemos acotar por "Revolución Científica" se halla expuesto a controversia. La más penetrante, sin embargo, fue la mantenida entre Betty Jo Dobbs y Richard S. Westfall, a quienes está dedicado una nueva reflexión sobre la realidad, contenidos y límites de ese período (*Rethinking the Scientific Revolution*). Lo que nadie cuestiona es el hito que inicia el cambio decisivo (*Nicolaus Copernicus Gesamtausgabe: Opera Minora*), ni la pugna ideológica que arrastra (*Giordano Bruno. Opere Italiane* y *Giordano Bruno and Renaissance Science*).

Con Nicolás Copérnico (1473-1543) cae el sistema ptolemaico y comienza la astronomía moderna, esbozada en un primer opúsculo sobre las hipótesis de los movimientos celestes y desarrollada en su tratado sobre las revoluciones de los cielos. Pero él, que había estudiado medicina en Padua, escribió también en torno al régimen de salud, es decir, a la dietética, sin apartarse del galenismo humanista, y, formado en derecho en Bolonia y Ferrara, redactó un muy ponderado librito sobre el precio del dinero, innovador. Estas dos obras menores son las que constituyen el grueso del volumen quinto de su *Gesamtausgabe*. Agrégase un delicioso prólogo, en el más estricto estilo humanista, a su traducción latina de las *Epístolas morales, agronómicas y amatorias* de Theophylaktos Simokattes. Con un dominio excelente de la lengua del Lacio, donde no falta la cita clásica, dedica tal empeño a Lucas, obispo de Ermland.

Son justamente esos textos menores los que prueban el hilo de continuidad del saber precedente, no obstante el giro irreversible que a principios del XVII iban a provocar sus ideas cosmológicas. Los textos médicos aparecen en las páginas de respeto de otros libros. Se trata de anotaciones relacionadas con el ejercicio de su labor asistencial en el cabildo catedralicio. Abundan las recetas contra trastornos muy comunes: cefaleas, gingivitis, disentería, cálculos, constreñimientos, luxaciones, apoplejía. Su *Regimen sanitatis* es un listado de indicaciones para cada mes del año. Aconseja la moderación en el vino y la comida, la limpieza bucal y la higiene corporal frecuentes; para ello se basa en fuentes bajomedievales, algunas tan denostadas ya por sus contemporáneos como las *Pandectas* de Mateo Silvático. En 1517 saca a la luz *De estimatione monetae*, dedicado a la naturaleza y función del dinero, entendiendo por éste la pieza de oro o planta acuñada con la cual se fijan los precios de las cosas que se compran o venden de acuerdo con el valor impuesto por los gobiernos. Alertaba contra uno de los peligros sempiternos, los fraudes en la ley.

La dispar interpretación de la Revolución Científica mantenida por Dobbs y Westfall tuvo su precedente en Frances Yates y su *Giordano Bruno and the Hermetic Tradition*, donde evidenciaba el peso determinante de la magia en el nolano. Contra esa tesis se revuelve Hilary Gatti con obsesiva pasión. Su *Giordano Bruno and Renaissance Science* es un alegato contra Yates más que una razonada defensa de la "cientificidad" de Bruno, al que vincula con el pitagorismo y la corriente de filosofía magnética que va de Ficino a Gilbert.

Gatti se deja arrastrar en su vehemencia por anacronismos sorprendentes. Así, a propósito de la me-



Oficina química. Grabado en cobre de B. Audran (París, 1756)

moria. Si en Bruno las imágenes se inscriben en una tradición mágica de signos ocultos de las ideas, Gatti afirma que nos hallamos ante una avanzadilla de la inteligencia artificial contemporánea a través de iconos. Frente a la lectura de un Bruno adscrito al neoplatonismo en cosmología, Gatti lo convierte en precursor de la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Si en el siglo XIX, remacha, hubo quien lo adelantó a Darwin, nada impide que la filosofía natural del nolano vislumbrara conceptos y debates de la física actual. Y en filosofía de la ciencia, sitúa la epistemología bruniana, alérgica a toda expresión matemática de la realidad, en una vía media entre el falsacionismo de Popper y el anarquismo de Feyerabend.

En cualquier caso, el lector dispone ahora de una edición accesible del *Candelaio, La cena de le Ceneri, De la causa, principio et uno, De l'infinito, universo et mondi, Spaccio de la bestia trionfante, Cabala del cavallo pegaseo* y *De gl'heroici furori*, presentadas por Eugenio Canone. Bruno esboza sus tesis cosmológicas en *La cena de le Ceneri* y las desarrolla en *De l'infinito, universo et mondi*, junto con otros textos latinos, en particular su famosa trilogía de Frankfurt. Parte de la doctrina copernicana para trascenderla en lo que se ha denominado ultracopernicanismo, donde rechaza la imagen de un cosmos estratificado en esferas para defender un universo infinito y homogéneo. No hay más distinción que la de predominio; es decir, en las estrellas o soles domina el fuego; en los planetas, el agua o la tierra. El sistema planetario constituye la unidad fundamental que se itera sin fin en un espacio lleno de aire o éter; el universo es una congregación de tales sistemas o mundos animados y autorregulados a la manera de los organismos.

Dobbs da un paso más en la línea de Yates. Sus trabajos sobre el significado de la alquimia y la teología en Newton minaron la interpretación admitida de la Revolución Científica, uno de cuyos articuladores más conspicuos había sido Westfall. Arranca Dobbs de las notas características de toda revolución según I. B. Cohen: cambio súbito, radical y completo. Pues bien, la recepción del copernicanismo progresó con exasperante parsimonia, el fenómeno se extendió entre 150 y 500 años y no hubo un abandono absoluto del aristotelismo. Por si fuera poco, las preocupaciones intelectuales de Newton tenían mucho más que ver con la teología y la alquimia que con la física y la matemática, sobre las que descansa su reputación moderna.

En su análisis, Westfall mira hacia el futuro. Del pasado lo que importa, sostiene, son los desarrollos que condujeron a nuestra comprensión actual del mundo. A Newton lo recordamos por sus contribuciones a la física, óptica y matemática, no por sus estudios sobre alquimia y teología. Para Westfall hacia 1700 existía ya una ruptura definitiva entre el aristotelismo y la nueva ciencia que emergía en el siglo XVII: el cosmos finito de Aristóteles se sustituyó por un universo newtoniano infinito, se matematizó y mecanizó la naturaleza y, por fin, la experimentación ocupó un papel destacado en la justificación de las teorías científicas. Es cierto que no había más de una decena de heliocentristas convencidos hacia 1600. Pero no lo es menos que, cincuenta años después, muy pocos lo rechazaban. Por mor de la doctrina copernicana, se reconocía el carácter planetario de la Tierra; con Kepler, el heliocentrismo marcó el comienzo de la mecanización de la naturaleza. Otros estudios reunidos en la compilación de Osler respaldan, sin embargo, la fuerza de la teología en la mente y obra de Newton. Al privilegiar la física matemática y óptica de Newton porque son a la postre los aspectos que han prevalecido, perdemos de vista, coinciden muchos, la identidad del protagonista.

Frente a Butterfield, que insertó el descubrimiento harveyano de la circulación de la sangre en la tradición del aristotelismo de Padua, Westfall lo acomodaba en su explicación de la filosofía mecanicista. La historia posterior prefiere hablar de múltiples tradiciones en el desarrollo de la anatomía, fisiología y medicina. En opi-

Astronomía para todos

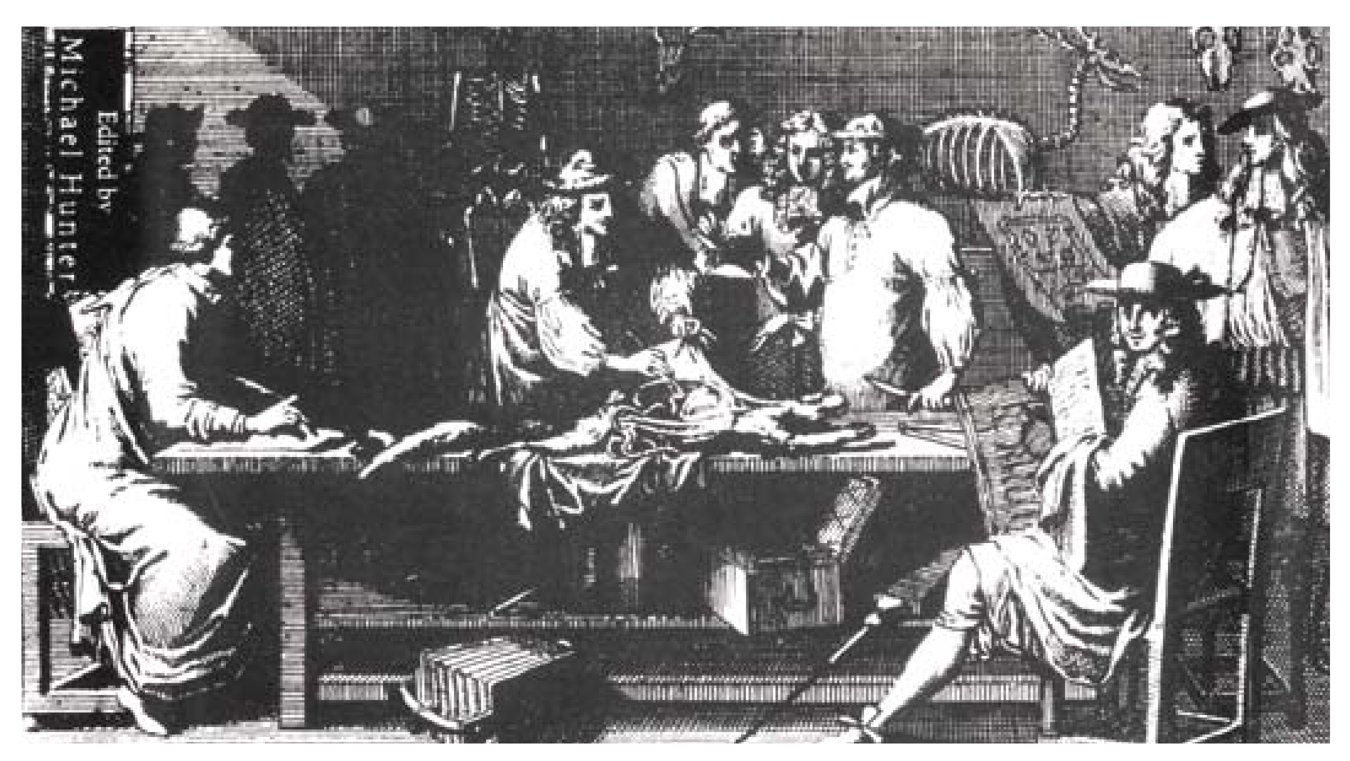
Astronomical Equipment for Amateurs, por Martin Mobberley. Springer, Londres, 1999.

Es un hecho que hay cada vez más aficionados a la astronomía, y que esta afición requiere tarde o temprano la adquisición de un equipo. También es un hecho que la multiplicación industrial de material de observación astronómica hace que este equipamiento sea cada vez más completo y asequible, y que muchos aficionados consigan un instrumental comparable a veces, si no en dimensiones, sí en calidad, al de muchos observatorios profesionales. La dificultad que requiere semejante equipamiento no sólo exige un considerable desembolso pecuniario, sino un conocimiento de las posibilidades del material y de su adaptación al equipo ya disponible. De aquí las decepciones de muchos cuando, después de adquirir algún costoso instrumento, se encuentran con que no es el más adecuado a su situación o a las circunstancias en que tienen que desenvolverse.

Martin Mobberley, presidente de la British Astronomical Association, ha manejado el más variado material de observación, tanto por lo que se refiere a todo tipo de telescopios, como al instrumental auxiliar, lo mismo en el campo de la astrofotografía que en el de la informática. Es un experto en instrumental y, con tono coloquial, explica de una forma directa y práctica qué tipo de material debe emplear cada aficionado dentro de su nivel de capacidad, científica o económica, cuál es la solución más adecuada y cuáles son las dificultades más probables con que se va a encontrar. De aquí que uno de los rasgos más característicos del libro sea no sólo un buen puñado de consejos prácticos para optimizar el uso del material, sino, sobre todo, enseña lo que no debe hacerse.

El libro se divide en trece capítulos: 1) fundamentos para principiantes; 2) refractores y reflectores; 3) Catadióptricos, Cassegrains y S-C.; 4) binoculares; 5) oculares; 6) monturas; 7) accesorios (incluso fotográficos: es el capítulo más extenso del libro, 55 páginas); 8) imágenes electrónicas; 9) procesado de imagen y sistemas de software; 10) videoastronomía; 11) observatorios para aficionados; 12) equipos para observación solar, y 13) atlas celestes. En suma, un elenco completo, en el que sólo echaríamos de menos la alusión a micrómetros y fotómetros, y una más amplia bibliografía (sólo cita nueve títulos...).

—José Luis Comellas García-Llera



Clase de dirección. (Tomado de Memoires pour servir à l'histoire naturelle des animaux et des plantes par Messieurs de l'Academie royale des sciences*, 1736.)*

nión de Andrew Cunningham el objetivo era mostrar las obras del Creador, más que introducir métodos observacionales y experimentales. Por tanto, la obra de Harvey debe entenderse en el contexto general y no en el marco restringido de una revolución científica *tout court*.

De nuevo la solución está en las fuentes (*Archives of the Scientific Revolution. The Formation and Exchange of Ideas in Seventeenth-Century Europe*). De muchas figuras de ese período disponemos de solventes ediciones críticas. Pero la visita a los fondos institucionales o a los diversos archivos nos depara importantes noticias relativas al entramado de relaciones que ayudan a entender la evolución de firmantes y aludidos. Se conservan manuscritos de Robert Boyle (Regia Sociedad), Galileo Galilei (Biblioteca Central de Florencia), G. W. Leibniz (Biblioteca del Estado de Hannover) o Christian Huygens (Biblioteca Universitaria de Leiden). Los manuscritos de Isaac Newton se reparten entre la Biblioteca Universitaria de Cambridge, King's College de Cambridge y la Universidad Hebrea de Jerusalén.

Las bibliotecas y archivos son entidades sumamente frágiles, vulnerables al saqueo y destrucción. Los manuscritos de la primera época de Marcello Malpighi fueron pasto de las llamas en 1684, suerte que corrió la obra magna de Francisco Hernández sobre botánica novohispana. A mediados del siglo XVII la chusma acabó con los cuadernos de Harvey. Desde siempre, las familias han venido dispersando los legados. Lo sucedido con los escritos de Boyle en el XVIII ilustra un proceso muy repetido: los descartados para su publicación desaparecieron, bajo la excusa de que hablaban de trivialidades o afeaban su reputación (alquimia). En el siglo XIX el legado de Newton se dividió entre "material científico serio", cedido a custodia institucional, y el resto —supuestamente carente de interés científico— otorgado a la familia. Como era de esperar, ésta se lo vendió en subastas.

La grafía de los manuscritos nos revela no sólo las distintas épocas de un autor, sino también grafías de otras que pudieron intervenir en la elaboración de sus trabajos. De esa época revisten especial interés las anotaciones de laboratorio, así como los objetos de gabinete, instrumentos y curiosidades, que nos perfilan el entorno intelectual del personaje.

El historiador de la Revolución Científica debe navegar con seguridad en el mar de las ideas que entreveran las tesis físicas, biológicas y químicas (*Studies in Seventeenth-Century European Philosophy*). La filosofía de la Europa del siglo XVII se debate entre tensiones científicas y teológicas. Entre el rechazo de la escolástica y la fuerza con que irrumpe el atomismo. Entre Malebranche, Descartes, Gassendi y Leibniz. Sea, por ejemplo, el origen del conocimiento. Desde que Antoine Arnauld escribió su "cuarto conjunto de objeciones" a las *Meditaciones* cartesianas, los estudiosos cayeron en la cuenta de los puntos de coincidencia entre la criteriología de san Agustín y la de Descartes. Este en las *Meditaciones* y aquél en el diálogo *De libero arbitrio* comienzan con el conocimiento indubitable del sujeto como ser pensante. Olvidándose de los sentidos, parten de la doctrina del alma para llegar hasta Dios, donde descansa la fuente de la verdad. Hacia el final de su vida, Descartes afirmaba en respuesta a Henricus Regius que "no hay nada en nuestras ideas que no esté innato en la mente". Las propias ideas sensoriales deben ser innatas, por la sencilla razón de que son producidas por una facultad de la mente.

Con implicaciones en el concepto de fuerza, debatíase la noción de causa. Malebranche defendía que ninguna substancia finita, fuera cuerpo o mente, podía ser fuente de una conexión necesaria con otra cosa, en tanto que Guelincx postulaba que sólo podía considerarse causa aquello que pudiera asegurar su efecto. Entra en juego una disputa hoy relegada al ol-

vido, la doctrina del ocasionalismo, según la cual Dios es el único agente causal verdadero, en cuyas operaciones *qua causa* se incluyen todos los fenómenos de la naturaleza. Los filósofos cartesianos parecían incapaces de explicar la causa, dada la separación absoluta entre mente y cuerpo por ellos mantenida: el pensamiento inextenso y la materia como pura extensión no tenían absolutamente nada en común, y, por tanto, no cabían puentes de anclaje entre ellos; ni el cuerpo podía ser la causa de fenómenos mentales (pensamientos, sensaciones) ni la mente podía causar movimientos en el cuerpo. Al no poder darse ninguna interacción remitían a un *deus ex maquina*. Lo que parecía ser una interacción causal era en realidad la actividad constante de Dios en la producción de pensamientos con ocasión de ciertos movimientos corporales (en el cerebro) y movimientos en el cuerpo con ocasión de ciertas voliciones en la mente. Por decir toda la verdad, los pensadores del XVII que recurrieron al ocasionalismo no se limitaron al problema cuerpo-mente.

El joven Leibniz se propone armonizar un Aristóteles depurado de escoliastas con el nuevo mecanicismo. Con los años integra en ese afán los descubrimientos del microscopio. Para aclararnos en su monadología no podemos prescindir del mundo de los microorganismos. Aunque la teoría de leibniziana sobre los átomos inmateriales o mónadas evoca cierta adscripción al atomismo en boga, le separa de éste el carácter "sentiente" que les otorga, y eso se lo debe a la observación de seres increíblemente minúsculos y zigzagueantes en el microscopio. Durante algún tiempo, Leibniz llegó a creer que todos los objetos eran agregados de animálculos.

Junto a las figuras eximias, aupándolas, hubo en la Revolución una sobresaliente masa crítica (*La Chimie de Nicolas Lemery* y *Giorgio Baglivi. Carteggio*), imbuida del pensamiento cartesiano o gassendista. Michel Bougard ha rescatado en una monografía encomiable de Nicolas Lemery (1645-1715) el fuste científico de la química anterior a Lavoisier, a caballo entre la iatroquímica paracelsista y la química stahliana del flogisto.

¿Cuáles eran los perfiles de la química del último tercio del siglo XVII? En primer lugar se trataba de una ciencia genuina, con su propio lenguaje, sus instrumentos propios (reactivos, balanzas) y su fundamentación en el ensayo experimental repetible. Por eso puede incorporarse a la enseñanza. De los múltiples manuales destaca el de este apotecario y médico parisiense cuyo *Cours de Chymie*, aparecido por vez primera en 1675, se traduciría al alemán, holandés, inglés, italiano, latín y español. (La influencia de Lemery en nuestra patria llegó por vía del plagio y de la versión de Félix Palacios.). Al curso le siguieron, entre otras, una *Pharmacopée Universelle* y un *Traité de l'Antimoine*, todavía citado.

En su búsqueda de los últimos componentes de la materia, los paracelsistas habían propuesto tres "elementos", la "tria prima" que podían aislarse de las sustancias que los contenían gracias al fuego. El ejemplo que se empleará reiteradamente a lo largo de los siglos XVII y XVIII era el de la combustión de la madera. Al arder, un leño produce las llamas, es decir, libera su principio de combustibilidad (su azufre); el humo, idéntico al principio de volatibilidad (su mercurio), y cenizas, asimiladas al principio de fijación (la sal). Para los iatroquímicos el fuego era el medio para "abrir la materia". En 1663 Christophe Glaser publicó su *Traité de la Chymie*. Confiesa que sólo escribe de lo que ha experimentado. Entiende la química como un arte por el que se aprende a disolver los cuerpos con el fin de extraer las diversas sustancias que los componen y reunirlas y formas otros cuerpos. Glaser distingue cinco principios en la reducción de los mixtos: tres que considera activos (el espíritu o mercurio, el aceite o azufre y la sal) y dos pasivos (el agua o flema y la tierra). Glaser enseñó química a Lemery.

Boyle admitía en *Sceptical Chymist* tres principios discordantes con la espagiria clásica: materia, movimiento y reposo. De ellos dependían el color, el olor, el sabor, la fluidez, la solidez, la magnitud, la figura y el peso. Principios que, en última instancia, reducía a sólo dos, la materia y la estructura (o la forma). No creía en la existencia de elementos primigenios y proclamaba que toda sustancia podía transformarse en otra.

Boyle y Lemery suponían a la materia constituida por corpúsculos en movimiento. Entiende el francés que la química nos enseña de qué modo las aguas vitriólicas y metálicas se coagulan en las entrañas de la Tierra y crean los minerales, los metales y las piedras de acuerdo con las diversas matrices que encuentran. La química nos da una idea sensible de la vegetación y del crecimiento de los animales por la fermentación y la sublimación.

Sigue a su maestro Glaser en el reconocimiento de los principios. Los químicos, recuerda, llaman activos a tres de ellos (espíritu, aceite y sal) y pasivos a los otros dos (agua y tierra). Se les denomina activos porque, hallándose en agitado movimiento, operan toda la acción del compuesto; en tanto que los pasivos, encontrándose en reposo, sólo sirven para detener los principios activos. El espíritu o mercurio es el primero en aparecer en el análisis químico; se trata de una sustancia sutil, penetrante, ligera, que está en mayor agitación que los demás. El aceite o azufre, que debe su nombre a su carácter inflamable, es una sustancia dulce, sutil, untuosa, que aparece después



Nicolas Lemery

Química orgánica

PROTECTING GROUPS, por Philip J. Kocienski. Georg Thieme Verlag; Stuttgart-Nueva York, 2000.

El esqueleto carbonado de los compuestos orgánicos sería de insulsa estabilidad cinética sino fuera por la presencia de los grupos funcionales. Estos procuran no sólo muchas de las propiedades físicas de dichos compuestos sino también su reactividad y la posibilidad de reconocimiento molecular, a la vez que contribuyen a la existencia de millones de compuestos orgánicos distintos.

Uno de los aspectos fundamentales de la química orgánica es la capacidad de síntesis de la mayoría de dichos compuestos. En la síntesis orgánica deben concatenarse adecuadamente los átomos de carbono para formar las cadenas o ciclos correspondientes: en definitiva, crear enlaces carbono-carbono. Pero también los grupos funcionales han de poderse crear, manipular o transformar... y casi siempre en presencia de otros grupos funcionales. La naturaleza realiza síntesis complejas en presencia de distintos grupos funcionales, debido a la alta selectividad de los sistemas enzimáticos, capaces de discernir entre grupos funcionales e incluso entre distintas posiciones de grupos idénticos. Pero esto es mucho más complicado en las síntesis de laboratorio. Por ello es necesario la protección de grupos funcionales para que éstos no interfieran con los reactivos usados en las etapas sintéticas y para dirigir la síntesis hacia los grupos funcionales libres. Siendo también importante su eventual desprotección para que aparezcan como tales en medio o al final de la síntesis.

El volumen que comentamos es la edición corregida de la primera publicada en 1994 por Philip J. Kocienski que tuvo en su momento, y tiene aún, una aceptación extraordinaria entre los químicos orgánicos sintéticos. Probablemente, junto con la publicación de características similares de T. Greene, sea el libro más consultado para prever la protección de un grupo funcional, habiéndose convertido en estos pocos años en un clásico y punto de referencia, especialmente por su original aproximación didáctica. Kocienski introduce muy adecuadamente la idea de la protección ortogonal de los grupos funcionales, es decir, que determinados grupos protectores pueden ser eliminados en cualquier orden con reactivos y condiciones que no afecten la presencia de otros grupos funcionales. De este modo la linealidad del esquema sintético previsto se cumple totalmente. Por otro lado, a diferencia de lo que se encuentra en otras obras similares, Kocienski no expone una larga y exhaustiva lista de todos los grupos protectores posibles de un grupo funcional, muchas veces inútil, sino que se limita a unos cuantos. Los grupos funcionales, en sentido amplio, que se protegen son cinco: hidroxilo, dioles, carboxilo, carbonilo y amino, y en total son sólo cincuenta los grupos protectores que se estudian, precisamente los que han hecho méritos para estar en esta lista y que se han acreditado como más efectivos: en definitiva los que el químico usa en su repertorio sintético.

Se incluyen más de 500 esquemas que ilustran la aplicación del grupo protector y, sobre todo, para cada ejemplo, se indica no sólo el método de protección sino lo que muchas veces es más importante, su desprotección o rotura. Un bien estructurado capítulo de contenidos, una amplia cita bibliográfica y un exhaustivo índice por materias redondean una obra de consulta, absolutamente necesaria para todos los que cultivan la síntesis. —JOSEP FONT

del espíritu. Ultima en aparecer, es la sal una sustancia incisiva y penetrante que confiere consistencia y pesantez al compuesto, preservándole de la podredumbre y excitando los diversos sabores según su diferente mezcla. El agua o flema es el primero de los principios pasivos. La tierra o caput mortuum no puede extraerse pura, porque siempre retiene algunos espíritus. Para Lemery la reacción química constituye un proceso violento, donde las transformaciones sólo son posibles a través de remodelaciones de partes que pueden ajustarse o por las fracturas de estructuras que entrechocan.

Otro segundón de lujo fue Giorgio Baglivi. Anna Toscano ha compilado y anotado la correspondencia, depositada en la biblioteca universitaria "Carolina Rediviva" de Uppsala. El epistolario reúne 193 cartas, fechadas entre 1690 y 1704. En concreto el libro recoge 17 autógrafas de Baglivi, 166 remitidas a él y 10 misivas diversas. Baglivi se cartea con Andry, Hecquet, Manget, Schröck, Hotton, Fantoni, Gabbrielli, Harris, Cole, von Berger, Magliabechi, Bellini, Tozzi, Grandi, Vallisneri, Valsava, Caspar Osterchamp, Musgrave, Pascoli, Ramazzini, Del Papa, Sherard. Con una pléyade, pues, de figuras destacadas de la medicina e historia de finales del seiscientos.

La correspondencia desempeña un papel decisivo en la comunicación científica en esa centuria y en la siguiente. En buena medida gira aquí en torno a la resonancia del *De praxi medica* y el *Specimen quatuor librorum de fibra motrice et morbosa*, dos obras de reconocida influencia en Friedrich Hoffmann, Hermann Boerhaave y Albrecht von Haller. La primera contiene las líneas programáticas de su sistema. Apelando al experimentalismo hipocrático y al método inductivo, Baglivi sostenía el primado de la experiencia en medicina, sin rechazar empero la fisiología mecanicista. Confluían en él la iatromecánica y la metodología rediana. Con todo, consideraba a la observación el quicio del arte, el *hilo* que los médicos debían seguir en sus especulaciones.

Pese a declararse escéptico sobre la posibilidad de remontarse al origen de los fenómenos morbosos, abogaba por el modelo geométrico-matemático como el más idóneo para explicar las funciones del organismo humano. La estructura del cuerpo y los efectos que de él dependían resultaban, en su opinión, sujetos al dominio del peso, del número y la medida. Por eso, los filósofos y los médicos mecanicistas debían dedicarse al estudio del cuerpo animado según los principios de la estática, de la hidráulica y del movimiento de los graves, a los cuales por lo demás eran reconducibles las soluciones, las sublimaciones y las precipitaciones estudiadas por los químicos.

Discípulo y seguidor de Malpighi, defendía una teoría "solidista" de la salud, concebida como estado óptimo de las partes sólidas del cuerpo, y en particular de las fibras, que Baglivi estudiaba mediante finas disecciones y observaciones microscópicas de la musculatura lisa y estriada. Reconocía en la fibra motriz el elemento vital primario.

LUIS ALONSO